Transport von Gemälden – Grundlegende Aspekte und Vibrationsmessungen während eines Kunsttransports

Nathalie Braun

Bachelorarbeit

Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt
26.08.2013

Betreuer: Dipl.-Geophys. Robin Groschup
Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Christian Große

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN - Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung
Prof. Dr.-Ing. Christian Große
Baumbachstr. 7 81245 München Tel.+49.89.289.27221 www.zfp.tum.de

Aufgabenstellung für eine Bachelorarbeit

Titel: Transport von Gemälden – Grundlegende Aspekte und Vibrationsmessungen während eines Kunsttransports

Betreuer: Prof. Christian Große, Robin Groschup

Tel: (089)28927041

eMail: grosse@cbm.bv.tum.de, groschup@cbm.bv.tum.de

Hintergrund:

Aufgrund wechselnder Ausstellungsorte oder Wechsel des Besitzers müssen Kunstgegenstände verpackt und transportiert werden. Für die Kunstwerke entstehen während solcher Transportvorgänge Belastungen, die sie beschleunigt altern lassen können oder im Extremfall sogar beschädigen. Zu den Einwirkungen während des Transports zählen z. B. neben mechanischen Erschütterungen auch klimatische Größen wie wechselnde Luftfeuchtigkeit und Temperaturgänge. Derartige physikalische Größen können mit Sensorik und Aufzeichnungsgeräten wie sie allgemein in der Zerstörungsfreien Prüfung Anwendung finden, gezielt erfasst und untersucht werden.

Aufgabenstellung:

Im Rahmen der Bachelorarbeit soll mit Hilfe von Fachliteratur und durch Befragung von Restauratoren zunächst geklärt werden, welche kritischen Einflussgrößen auf Kunstgegenstände beim Transport und welche Schäden auftreten können. Der Stand der Technik bei Verpackung und Transport ist zu beschreiben.

In einem experimentellen Teil der Arbeit soll der Transport eines Kunstgegenstandes mit Sensoren und Aufzeichnungsgeräten begleitet werden, um die zuvor definierten kritischen Einflussgrößen zu überwachen. Dabei ist insbesondere auf mögliche Messfehler und Effekte der Sensorplatzierung einzugehen. Einschränkungen, die sich durch die Wahl der Aufzeichnungsgeräten (z.B. batteriebetriebene Datenlogger) ergeben, sind zu beschreiben.

Die ausgewerteten Daten sollen in Bezug auf ihr Schädigungspotential bewertet werden.

Empfohlene Arbeitsschritte:

- Literaturrecherche
- Führen von Interviews mit Restauratoren
- Einarbeitung in die Messgeräte
- Instrumentierung eines Kunsttransportes zur Erfassung kritischer Einflussgrößen
- Erläuterung der Sensorplatzierung
- Datenauswertung und Beurteilung der Daten im Hinblick auf ihre Relevanz für Schäden
- Anfertigung der schriftlichen Ausarbeitung unter Berücksichtigung des Layouts des Lehrstuhls
- Vorstellung der Ergebnisse und Abgabe aller Schriftstücke und Daten in elektronischer Form

Die Bewertungskriterien für die Bachelorarbeit liegen vor und sind der Bachelorandin bekannt. Die Vorstellung der Ergebnisse erfolgt in einem etwa 30-minütigen Vortrag, an den sich die Notenfindung anschließt. Zu diesem Zeitpunkt liegt die korrigierte Endversion der Bachelorarbeit den Prüfern vor.

Beginn der Bachelorarbeit: 26.03.2013

Voraussichtliche Dauer: 5 Monate

Datum, Unterschrift des betreuenden Professors:

Datum, Unterschrift des Betreuers:

Datum, Unterschrift der Studentin:

Nathalie Braun

Unterfeld 24

82041 Oberhaching

Matr.Nr. 03612495

ERKLÄRUNG:

Hiermit versichere ich, die vorliegende **Bachelorarbeit** selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet zu haben.

München, den 26.08.2013

Nathalie Braun

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung

Kunstwerke sind einer Vielzahl unterschiedlicher Belastungen ausgesetzt. Kunsttransporte sind dabei als Ursache möglicher Beschädigungen von besonderer Bedeutung. Unabhängig davon, aus welchem Anlass bzw. mit welchem Ziel Kunstwerke transportiert werden, ist von großem Interesse, die genaue Ursache auftretender Belastungen und deren Auswirkung auf den Zustand der transportierten Kunstwerke zu analysieren.

Zu diesem Zweck wird im ersten Teil dieser Arbeit mit Hilfe von Fachliteratur und durch die Befragung von Restauratoren zunächst geklärt, warum Kunstgegenstände transportiert werden und welche Einflussfaktoren in diesem Kontext relevant sind. Diese Einflussfaktoren müssen des Weiteren definiert und entsprechend erläutert werden. Abschließend wird in diesem Kapitel das Ziel der vorliegenden Arbeit ausgearbeitet.

Der darauf folgende theoretische Teil basiert auf einer umfassenden Literaturrecherche und verschiedenen Expertenmeinungen aus der Praxis, welche dem aktuellen Stand der theoretischen Wissenschaft gegenübergestellt werden. Nachdem für das weitere Verständnis dieser Arbeit notwendige Fachbegriffe messtechnischer und restauratorischer Art definiert sind, werden im Anschluss mögliche auftretende Schadensbilder aufgeführt und auf ihr Gefahrenpotential hin bewertet. Ebenfalls spielen die Wahl des Transportfahrzeugs sowie die eingesetzte Transportkiste im Rahmen von Kunsttransporten eine besondere Rolle und werden deshalb ausführlich beschrieben. Des Weiteren wird die allgemeine Funktionsweise eines Datenloggers erklärt und die für den Kunsttransport in Frage kommende Technik aufgeführt.

Der anschließende experimentelle Teil beschreibt die Durchführung eines selbst erarbeiteten Versuchskonzepts, welches bei der Transportüberwachung zur Anwendung kommt. Hierfür wird zunächst die Wahl der eingesetzten Technologie begründet und mit Hilfe von verschiedenen Vorversuchen werden Einschränkungen hinsichtlich der Versuchsdurchführung festgelegt. Die endgültige Parameterwahl wird sowohl durch die gewonnenen Erkenntnisse aus den eigens durchgeführten Vorversuchen sowie der vorliegenden Fachliteratur bestimmt. Daraufhin werden die prägnanten Ereignisse des beobachteten Transportvorgangs identifiziert und weitergehend analysiert. Die darauf folgende Versuchsauswertung wird mit Hilfe von Maximalwerten, Grenzwerten und einer RMS-Analyse durchgeführt. Auf Basis dieser ist es möglich, eine detaillierte Interpretation der Ergebnisse vorzunehmen. Eine Fehleranalyse schließt an diesen Teil an, um die Aussagekraft der Messergebnisse beurteilen zu können.

Der letzte Abschnitt der vorliegenden Arbeit fasst die erarbeiteten Ergebnisse zusammen, zeigt mögliche Schlussfolgerungen auf und umreißt potentielle Vertiefungsgebiete für anschließende Arbeiten oder Versuchskonzepte.

2 Motivation

Kunstgegenstände werden aus einer Vielzahl unterschiedlicher Gründe transportiert. Neben naheliegenden und regelmäßig auftretenden Anlässen, wie dem Austausch bestehender Exponate im Rahmen des verfügbaren Kunstbestands einer Institution oder dem Transfer einzelner Kunstwerke sowie ganzer Sammlungen zwischen verschiedenen Institutionen, lassen sich weitere Anlässe für Kunsttransporte unterscheiden. So führen auch Bestandsaufnahmen, der Erwerb bzw. Verkauf von Kunstwerken oder aber notwendige Restaurierungsarbeiten am Kunstwerk selbst sowie in den Ausstellungsräumen dazu, dass Kunstwerke ihren ursprünglichen Aufbewahrungsort verlassen und transportiert werden müssen.

Für Kunstwerke entstehen im Rahmen solcher Transportvorgänge Belastungen, die zu einer beschleunigten Alterung oder im Extremfall sogar zu einer sichtbaren Beschädigung des Exponats führen können. Dabei gewinnt diese Problematik immer mehr an Relevanz, da die Ausstellungsdichte, die Anzahl der Exponate und ebenso die dokumentierten Folgeschäden kontinuierlich zunehmen [vgl. Bäschlin et al. 2012]. Die Ursache möglicher Schäden ist dabei in der Regel auf exogene Umwelteinflüsse oder aber mechanische Einwirkungen zurückzuführen.

Dabei ist eine genaue Beurteilung bzw. Zuordnung des Schädigungspotentials mechanischer Einflussgrößen aus einer Vielzahl an Gründen heutzutage nicht möglich. Zwar ist mittlerweile bekannt, dass die Bewegung von Kunstwerken als eine Ursache möglicher Beschädigungen in Frage kommt, jedoch ist nicht eindeutig geklärt, ob hohe singuläre oder aber niedrige dauerhafte Belastungen den wesentlichen Treiber hinter durch Bewegung verursachter Schäden darstellen. So gilt eine einmalige starke Einwirkung während des Transports einerseits als Hauptquelle möglicher Schäden, wohingegen andererseits vermutet wird, dass dauerhafte mechanische Belastungen und minimale Schwingungen, die ein Exponat beispielsweise an seinem gewohnten Ausstellungsplatz erfährt, eine viel höhere Belastung darstellen [vgl. Gespräch Poggendorf; Schwemer 2013]. Zwar wurden von einigen Instituten in der Vergangenheit einfachere Untersuchungen zum Einfluss mechanischer Belastungen durchgeführt, jedoch häufig ohne notwendige technische Hilfsmittel bzw. fundierte Auswertungsmöglichkeiten [vgl. Gespräch Simon 2013]. In der Wissenschaft existieren bereits seit den 1980er Jahren Erkenntnisse hinsichtlich des Einflusses von Schwingungen im Rahmen von Transportvorgängen, jedoch liegen aktuell weder in Bezug auf andauernde mechanische Belastungen am Ausstellungsort selbst noch hinsichtlich des Schädigungspotenzials von Transportvorgängen ausreichende Erkenntnisse vor [vgl. Richards et al. 1997]. Vielfach wurde darüber hinaus ein exklusiver Fokus auf klimatische Einflüsse, wie zum Beispiel Temperatur und Luftfeuchtigkeit gelegt, ohne dass dabei mechanische Größen untersucht wurden.

Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Gruppen, die an zerstörungsfreien Messmethoden zur Überwachung von Kunsttransporten interessiert sind. So zählen grundsätzlich all jene Personen, die ein Interesse am Substanz- bzw. Werterhalt von Kunstwerken haben, zum Kreis möglicher Adressaten. Für Museen, Galerien und Privatpersonen steht dabei der langfristige und

unbeschädigte Erhalt der Kunstwerke im Vordergrund, sei es aus kunsthistorischen, kulturellen oder aber kommerziellen Beweggründen. Für Spediteure und Versicherungen, die im Rahmen von Kunsttransporten eingebunden werden, steht die einwandfreie Durchführung der Dienstleistung, bzw. die Verhinderung möglicher Regressforderungen im Vordergrund [vgl. Gespräch Poggendorf; Schwemer 2013].

Um diese Problematik von einer wissenschaftlichen Perspektive näher erörtern zu können, wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit verschiedene Expertenmeinungen aus dem Forschungs- und Ausstellungsbereich unterschiedlicher Museen in Deutschland eingeholt. Dabei liegt das Ziel dieser Arbeit darin, mechanische Schwingungen, die auf Kunstwerke wirken, mithilfe von Sensorik, wie sie im Allgemeinen im Rahmen der zerstörungsfreien Prüfung zur Anwendung kommt, gezielt auf auftretende Maximalwerte zu untersuchen. Gleichzeitig soll ein Vergleich der einzelnen Transportabschnitte hinsichtlich ihrer Belastung angestellt werden und Schwingungsbilder aufgrund ihres Schwingungsmusters kategorisiert werden. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich aufgrund des sehr vielfältig interpretierbaren Begriffs ‚Kunstgegenstand' exklusiv auf textile Bildträger und schließt darüber hinaus Kunstwerke aus, bei denen von vornherein aufgrund der offensichtlichen Fragilität angezweifelt wird, dass sie den Transport unbeschadet überstehen und folglich als transportunfähig zu deklarieren sind [vgl. Begov et al. 2007].

3 Theoretischer Teil

3.1 Grundlagen

Um die verwendeten Fachbegriffe besser verstehen und einordnen zu können, werden im ersten Abschnitt dieser Arbeit die relevanten messtechnischen und restauratorischen Grundlagen genannt und definiert.

3.1.1 Messtechnische Grundlagen

Im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung kommen Fachbegriffe zum Einsatz, die einer Definition bedürfen.

Messwerte werden in Form von Schwingungen, welche die periodische Bewegung eines Teilchens [vgl. Magnus et al. 2013] beschreiben, gemessen (vgl. Abb. 3.1). Als Ruhelage wird der Zustand eines schwingungsfähigen Systems bezeichnet, welches sich im mechanischen, thermischen oder elektrischen Gleichgewichtszustand befindet. Die Ruhelage liegt nicht mehr vor, sobald das System eine äußere Störung erfährt [vgl. Magnus et al. 2013]. Eine Schwingung kann durch die Auslenkung und Periodendauer genau definiert werden. Der maximale Auslenkungswert wird als Amplitude bezeichnet. Die Periode bezeichnet den kleinsten Zeitabschnitt, der zwischen zwei gleichen Erscheinungen eines sich wiederholenden Vorgangs liegt [vgl. Magnus et al. 2013]. Die Periodendauer ist die Zeit, welche verstreicht, während eine Schwingung durchlaufen wird. Der reziproke Wert der Periodendauer T trägt den Namen Frequenz f (vgl. Gl 3.1) und gibt an, wie oft sich ein zeitlich periodischer Vorgang, bezogen auf die Zeit (in Sekunden angegeben), wiederholt [vgl. Magnus et al. 2013]. Die Einheit der Frequenz ist Hertz [vgl. Magnus et al. 2013]. Liegt die Frequenz also bei 4 Hz, so werden vier vollständige Perioden in einer Sekunde durchlaufen. Jedes Objekt besitzt eine bestimmte Eigenfrequenz. Wird ein Objekt in seiner Eigenfrequenz angeregt, kommt es zum Resonanzfall [vgl. Palmbach 2007]. Bei schwach gedämpften Schwingern können Schwingungsamplituden für Erregerfrequenzen in der Nähe der Eigenfrequenzen entstehen, man spricht von Resonanzerscheinungen [vgl. Magnus et al. 2013]. Es bildet sich eine dreidimensionale, stehende Welle (engl. Modes) mit typischen Schwingungsmustern aus [vgl. Palmbach 2007].

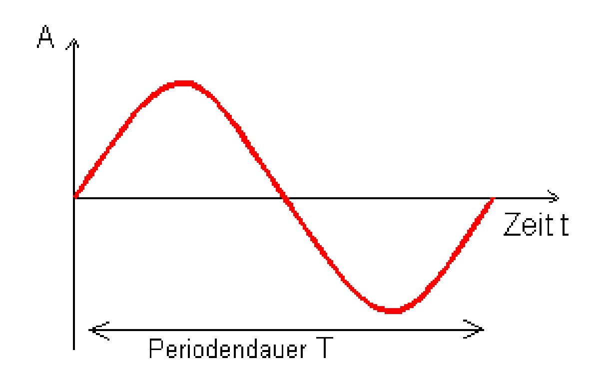


Abb. 3.1: Schwingung, Amplitude und Periodendauer

Frequenz/ Schwingungsdauer

$$f = \frac{1}{T}\,[\,Hz = \frac{1}{s}\,] \qquad \text{(Gl. 3.1)}$$

In der Messtechnik kommen Sensoren zum Einsatz. Diese können als technisches Bauteil angesehen werden, welches physikalische Eigenschaften in seiner Umgebung erfasst und in elektrische Signale umformt. Die Genauigkeit der Daten ist abhängig von der Empfindlichkeit und dem Rauschen des Sensors. Als Empfindlichkeit wird die Änderung eines Wertes der Ausgangsgröße eines Messgeräts, bezogen auf die verursachende Änderung des Wertes der Eingangsgröße, benannt [vgl. DIN 1319 2012-08]. Als Rauschen wird in der Messtechnik eine Störgröße bezeichnet, welche bei Messungen immer mit aufgezeichnet wird. Sie kann als eine Überlagerung des Messsignals verstanden werden.

Für die Auswertung der Daten ist das Abtasttheorem von Bedeutung. In Abhängigkeit dessen muss die Abtastfrequenz eingestellt werden, da das Abtasttheorem besagt, dass eine zeitabhängige Funktion f(t) mit der maximalen Frequenz f_0 durch eine Abtastrate wiedergegeben werden kann, deren Zeitabstände kleiner $t_A = \frac{1}{2} f_0$ sind (das zeitdiskrete Signal wird wieder exakt rekonstruierbar). Das heißt, um eine genaue Auswertung zu erhalten, sollte die Abtastfrequenz doppelt so groß wie die gewünschte Frequenz gewählt werden.

Um die gemessenen Werte den Raumrichtungen (vgl. Abb. 3.2) zuordnen zu können, müssen diese definiert werden. Der direkte Bezug zu den im Folgenden relevanten Kunsttransporten wird über die Zuordnung der Raumrichtungen am Beispiel eines im Rahmen von Transporten eingesetzten LKW beschrieben. Die z-Raumrichtung verläuft nach oben und unten vertikal beim Betrachten des LKW, die y-Raumrichtung im Bezug auf den LKW horizontal nach links und rechts und die x-Raumrichtung horizontal nach vorne und hinten.

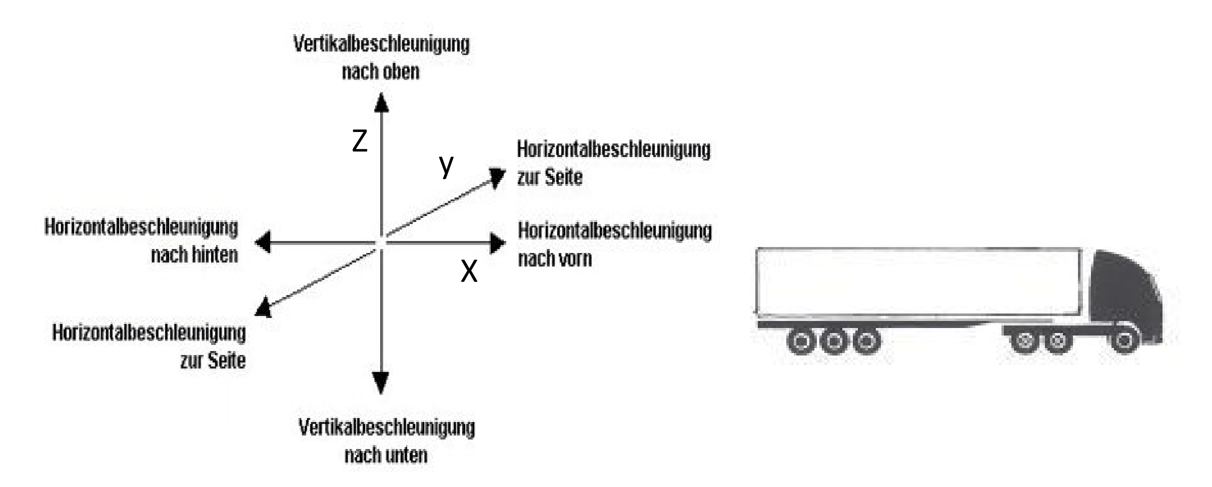


Abb. 3.2: Beschleunigungsrichtungen/Raumrichtungen x, y und z

3.1.2 Restauratorische Grundlagen

Im Kontext dieser Arbeit werden verschiedene restauratorische Grundbegriffe verwendet, die insbesondere hinsichtlich der Transportobjekte -, den Kunstwerken -, von zentraler Bedeutung sind. Zu diesen zählen neben dem Aufgabengebiet des Restaurators während eines Kunsttransports auch der im Rahmen dieser Arbeit häufig verwendete Begriff der Leinwand, dem zentralen Objekt der beschriebenen Kunsttransporte. Diese werden im Folgenden näher erörtert.

Grundsätzlich beschäftigt sich ein Restaurator mit der Konservierung, Erhaltung und Wiederherstellung von Kunstgegenständen aller Art. Darüber hinaus gehört die wissenschaftlich-technologische Erfassung von Kunst- und Kulturgut zu seinen zentralen Aufgabengebieten. Im Kontext von Kunsttransporten ist der Restaurator für die Dokumentation auftretender Veränderungen am Kunstgegenstand verantwortlich. So übernimmt ein Restaurator während des Kunsttransports die Aufgabe, den sogenannten Facility Report zu erstellen. Dieser Bericht dokumentiert den Zustand des Kunstwerks vor dem Transport und nimmt gleichzeitig den Zustand des Kunstwerks nach Abschluss des Transports auf. Durch einen Vergleich der beiden separat anzufertigenden Zustandsbeschreibungen lassen sich neu entstandene Schäden erfassen. Gleichzeitig übernimmt ein Restaurator häufig die Rolle des Kuriers während der Transporte. So wird für jedes zu transportierende Bild eine verantwortliche Person bestimmt, die das Kunstwerk während des gesamten Transports begleitet [vgl. Gespräch Poggendorf; Schwemer 2013].

Im Kontext der vorliegenden Arbeit wird unter dem Begriff ‚Kunstgegenstand‘ stets eine bemalte Leinwand verstanden. Die Leinwand selbst besteht aus einem Bildträger, welcher auf eine Rahmenkonstruktion gespannt ist. Der Bildträger wird dabei in der Regel aus Baumwolle, Leinen oder anderen textilen Fasern hergestellt, wohingegen die Rahmenkonstruktion grundsätzlich aus Holz besteht. Darüber hinaus gelten auch Holz, Papier, Metalle oder Knochen als Bildträger. Diese Werkstoffe spielen im Rahmen dieser Arbeit jedoch keine Rolle [vgl. Richards et al. 1997].

3.2 Einflussgrößen auf Kunstgegenstände

Grundsätzlich können neun wesentliche, potenziell schädliche Einflussfaktoren auf Kunstgegenstände unterschieden werden. Zu diesen zählen physikalische Zerstörung eines Kunstwerks, Diebstahl, Vandalismus, Feuer, Wasser, biologische Einflüsse wie z. B. Insekten sowie Verschmutzung, Strahlung, Temperatur und Luftfeuchtigkeit [vgl. Michalski 1991; Costain 1991]. Nicht alle der genannten Faktoren stehen in direktem Zusammenhang mit dem Transport von Kunstgegenständen und können zum Teil auch nicht mit Hilfe von zerstörungsfreien Messmethoden erfasst werden.

In den folgenden beiden Abschnitten werden daher nur diejenigen externen Einflussfaktoren näher beschrieben, welche eine besondere Relevanz im Kontext von Kunsttransporten besitzen und durch zerstörungsfreie Messmethoden bestimmt werden können. Diese speziellen Einflussfaktoren können in zwei Kategorien unterschieden werden. Neben sogenannten Um-

welteinflüssen wie Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit lassen sich mechanische Einflüsse wie Schock und Vibration differenzieren [vgl. Costain 1991].

3.2.1 Umwelteinflüsse

Wenn ein Kunstwerk transportiert wird, können die klimatischen Ausgangsbedingungen am Ursprungsort unmöglich durchgängig aufrecht erhalten werden – der Entleiher verliert sozusagen die klimatische Kontrolle über sein Exponat. Dabei besitzen Umwelteinflüsse wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit einen großen Einfluss auf Kunstwerke und können unter Umständen erhebliche Schäden anrichten. Lassen sich diese klimatischen Konditionen in einem Gebäude mit Hilfe moderner Technik nahezu vollständig kontrollieren, können sie im Rahmen von Kunsttransporten nur bedingt beeinflusst werden (vgl. Poggendorf 2005). Die Ursache lässt sich dabei keineswegs bekämpfen – lediglich die Wirkung kann eingeschränkt werden [vgl. Costain 1991].

Luftfeuchtigkeit

Luft ist ein Gemisch verschiedener Gase. Die Menge an Wasserdampf, die in der Luft enthalten ist, wird dabei als relative Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der Temperatur gemessen. Die Luftfeuchtigkeit liegt in einem gasförmigen Aggregatzustand vor, welcher bei vollständiger Sättigung Wasser als flüssigen Stoff (Kondenswasser oder Nebel) auswirft [vgl. Giancoli et al. 2012].
Im Rahmen von Kunsttransporten kann eine zu hohe bzw. zu niedrige Wasserdampfsättigung der Luft möglicherweise schädliche Auswirkungen auf textile Bildträger haben. Dabei lässt sich ein Kunstgegenstand durch Verpackung nur bedingt gegenüber exogenen Einflüssen abschirmen. Die relative Luftfeuchtigkeit der unmittelbaren Umgebung eines verpackten Kunstwerks unterscheidet sich zumeist von der im Inneren der Transportkiste (vgl. Kap. 3.7) vorherrschenden Luftfeuchtigkeit, welche vor dem verpacken des Kunstwerks auf dessen Optimum angepasst wurde (Öffnen der Kiste 24h vor Transportbeginn). Da ein Kunstgegenstand nur nahezu luftdicht verpackt werden kann (vgl. Kap. 3.8), dringt die äußere Luft langsam in das Innere der Transportkiste ein und nimmt so nach einiger Zeit Einfluss auf die im Inneren zu Anfang des Transports vorherrschende Luftfeuchtigkeit. Dadurch können Schäden am Exponat entstehen (vgl. Kap. 3.3). Die optimale relative Luftfeuchtigkeit für Gemälde liegt bei einer Temperatur von 17°C zwischen 50 und 55% und darf maximal um weitere 5% schwanken. Dieser Wert sollte im Idealfall trotz zum Teil erheblicher Unterschiede zu außen vorherrschenden klimatischen Bedingungen während des gesamten Transportes in der Transportkiste gehalten werden [vgl. Richards et al. 1997].

Temperatur

Neben einer unmittelbaren Einwirkung über die relative Luftfeuchtigkeit, welche in Abhängigkeit der Temperatur bestimmt wird, kommt die Temperatur auch per se als möglicher Schadensverursacher in Frage. Unterschiedliche Temperaturbedingungen, welche während des Transports auftreten, haben einen großen, bereits sehr weit erforschten Einfluss auf den Zustand textiler Bildträger [vgl. Richards et al. 1997].

Zwar reagieren textile Bildträger eher gering auf leichte Temperaturschwankungen, dafür haben Extremwerte, welche zum Beispiel durch jahreszeitbedingte Temperaturschwankungen im Sommer oder Winter auftreten, einen umso größeren Einfluss. So kann zum Beispiel die durch Klimatisierung geregelte Innentemperatur in einem Fahrzeug aus unterschiedlichen Gründen (Motorschaden, abgestellter Motor etc.) aufgrund extremer Außentemperaturen für Kunstgegenstände durchaus gefährliche Werte erreichen. Auch Wartezeiten im Rahmen des Entladevorgangs können unter Umständen dafür sorgen, dass ein Kunstgegenstand extremen Temperaturen ausgesetzt wird [vgl. Richards et al. 1997]. Im Winter erleiden Kunstwerke, die beispielsweise aus einem warmen Innenraum in ein nicht ausreichend klimatisiertes Fahrzeug verladen werden, größere und zum Teil gefährliche Temperaturschwankungen. Zwar ist der Einfluss der Außentemperatur immer in Abhängigkeit der Verpackung und somit der Größe und Form sowie der individuellen Luftdurchlässigkeit und dem Schichtaufbau der Verpackung zu bestimmen, doch lässt sich nicht verhindern, dass sich die Innentemperatur den äußeren Umständen annähert [ebd.].

Darüber hinaus ist bekannt, dass selbst die Temperatur innerhalb von Museen nicht immer der aus konservatorischen Aspekten optimalen Aufbewahrungstemperatur von 17°C entspricht. In vielen Museen wird die Raumtemperatur an die vom Menschen geforderte Behaglichkeit auf circa 23°C angepasst [vgl. Gespräch Poggendorf; Schwemer 2013].

3.2.2 Mechanische Einflussgrößen

„Neben Klima und Licht sind die Schwingungen die gleichberechtigt wichtigste Komponente, die zu Schäden an Kunstgegenständen beim Transport […] führen kann“ [Stühler 1987]. Die sogenannten mechanischen Einflüsse, wie Vibration und Schock, werden bereits seit geraumer Zeit kontinuierlich erforscht. Messungen und Aufzeichnungen von transportbedingten Erschütterungen und Vibrationen und der damit verbundenen Belastung sind bereits seit den 1980er Jahren dokumentiert [vgl. Richards et al. 1997]. Dynamische Belastungen treten in vielfältiger Weise auf, wodurch es teilweise zu Beschädigung oder sogar Zerstörung von Kunstobjekten kommen kann. Sowohl in Museen als auch beim Transport stellen sie eine permanente Gefahr dar –, vor allem für ältere Gemälde, bei denen es durch wiederholte Klimaschwankungen oder alterungsbedingte Degradationsprozesse zur einer herabgesetzten Gewebespannung gekommen ist [vgl. Palmbach 2007]. Jede dynamische Belastung eines Kunstgegenstands kann unter Umständen eine Mikroschädigung nach sich ziehen, wobei quantitative Zusammenhänge über die Beanspruchung und Schädigung speziell für Kunstobjekte bisher nicht existieren [vgl. Stühler 1990].

Vibration

Vibrationen können als „mechanische, sich wiederholende Schwingungen“ [Palmbach 2007] definiert werden. Abgrenzend zu einmaligen Schockevents handelt es sich bei Vibrationen um eine länger andauernde Einwirkung auf den Kunstgegenstand.

Häufig treten Vibrationen in direktem Zusammenhang mit mechanischen bzw. durch bestimmte Gerätschaften unterstützen Transportvorgängen (u.a. LKW-Transport, Transport mit Bilderwagen) auf. Als primäre Ursache kommen insbesondere die Motoren der Transport-

fahrzeuge oder aber ein falsch gewählter Reifendruck und somit nicht mehr vollständig auszugleichende Bodenbeschaffenheiten in Frage [vgl. Costain 1991]. Während des Verpackungsvorgangs selbst treten Vibrationen als mögliche Gefahrenquelle generell weniger häufig auf, da im Laufe des Verpackungsvorgangs durch ruckartiges Anheben oder Abstellen eher kurzfristige, starke Belastungen in Form eines Schocks zum Tragen kommen.

Insbesondere durch ihren kumulativen Effekt weisen Vibrationen ein hohes Schadenspotenzial auf. So kann durch mehrere aufeinanderfolgende Vibrationen in einem noch unproblematischen Bereich durch Addition der einzelnen Effekte ein kritisches Belastungsniveau erreicht werden. Gleichzeitig verstärkt sich die durch Vibrationen hervorgerufene Problematik sofern deren Frequenz mit der Eigenfrequenz des betroffenen Kunstobjekts übereinstimmen sollte [vgl. Costain 1991]. Darüber hinaus beschränkt sich die Wirkung von Vibrationen meist nicht nur auf eine einzige Raumrichtung sondern wirkt in alle drei Dimensionen – „bei Vibrationen und Erschütterungen wird ein Gemälde nicht nur in einer einzigen, sondern in drei Richtungen entlang den x-, y-, und z-Achsen gleichzeitig beschleunigt“ [Palmbach 2007].

Schock

Im Kontrast zu den häufig über einen längeren Zeitraum auftretenden Vibrationen, versteht man unter einem Schock ein einmaliges, zeitlich begrenztes Signal. „Eine Erschütterung oder ein mechanischer Stoss […] ist eine plötzliche, heftige, nicht periodische Störung eines mechanischen Systems“ [Palmbach 2007]. Die ungefähre Differenzierung zwischen einem Schock und einer Vibration ist dabei mit Hilfe spezifischer Grenzwerte in Bezug auf die maximal von einem bestimmten Untersuchungsgegenstand tragbare Amplitude möglich.
Am häufigsten treten exogene Schockereignisse laut Studien während der sogenannten ‚Handlingphase‘ im Rahmen von Kunsttransporten auf. Diese beschreibt die Abschnitte, in denen das Exponat von Menschenhand bewegt wird [vgl. Costain 1991]. Dabei besteht das größte Gefahrenpotenzial darin, dass die Kunstgegenstände verpackt oder unverpackt Stöße erfahren, bspw. durch unvorsichtiges Verladen oder Herunterfallen. Neben der Höhe, aus der ein Objekt fällt, dessen Geschwindigkeit und Eigengewicht bestimmen darüber hinaus sowohl die Materialhärte der Verpackung als auch die Härte des Untergrundes, auf den der Kunstgegenstand auftrifft, das Ausmaß und die möglichen Konsequenzen eines Schockereignisses [vgl. Marcon 1991b]. So ist die Stärke eines Aufpralls bzw. Stoßes im Rahmen eines LKW-Transports zum einen von der gefahrenen Geschwindigkeit und zum anderen vom befahrenen Straßenbelag abhängig. Ein langsam über ein Schlagloch fahrender LKW stellt in Kombination mit der fahrzeugeigenen Dämpfung durch Reifen und Federung durch eine geringere imaginäre ‚Fallhöhe‘ weniger hohe Belastung für einen Kunstgegenstand dar, als würde er die gleiche Strecke mit einer höheren Geschwindigkeit bewältigen [vgl. Palmbach 2007].

3.3 Mögliche Schäden

An Kunstgegenständen können im Laufe der Zeit aufgrund der in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen Einflussfaktoren Veränderungen auftreten, die zur Beschädigung des Kunstwerks führen können. Darüber hinaus kann auch die natürliche Alterung eines Kunstgegenstandes dafür sorgen, dass ohne exogene Einwirkung ein Schaden entsteht.

Der Begriff ‚Schaden' lässt sich aber in der Kunst nur schwer definieren. Anders als im alltäglichen Kontext kann nicht immer eindeutig festgestellt werden, was ein Schaden ist und wann die Belastungsgrenze eines Kunstwerks erreicht wird. Lässt sich bspw. bei einem Auto, welches eine Laterne streift und folglich eine Beschädigung am Kotflügel davon trägt, relativ genau sagen, wo der Schaden liegt, ist dies bei einem Kunstwerk nicht immer möglich. Für das Fahrzeug lässt sich recht einfach feststellen, in welcher Form eine Wertminderung aufgetreten (beschädigter Kotflügel) und wie dieser Schaden auszugleichen ist (Reparatur in einer Werkstatt). Entsteht dahingegen an einem Bild ein Schaden, lässt sich dieser unter Umständen zwar restaurieren bzw. ausbessern, niemals jedoch unsichtbar bzw. ungeschehen machen [vgl. Gespräch Poggendorf; Schwemer 2013]. Um den Begriff ‚Schaden' aus einer im Kontext der Kunst relevanten Perspektive näher zu beschreiben, werden im Folgenden wesentliche Schadensbilder detailliert aufgezählt. Dabei gilt ein Schaden stets als eine von außen herbeigeführte, sichtbare Veränderung des Kunstgegenstandes.

Der Begriff Craquelé bezeichnet ein maschenartiges Netz aus Rissen oder Sprüngen in der Bildoberfläche, welches auf die unterschiedliche Dehnungstoleranz von Bildträger und verwendeter Farbe zurückzuführen ist. Bietet eine Leinwand bzw. ein Bildträger noch eine recht hohe Flexibilität bzw. Dehnbarkeit, kann die aufgetragene Malschicht diese Bewegungen nicht immer vollständig abbilden, so dass die beschriebenen Craquelés entstehen [vgl. Gespräch Poggendorf; Schwemer 2013]. Dabei gilt bspw. eine zu hohe Luftfeuchtigkeit, die zu Quellerscheinungen am Holz der Rahmenkonstruktion einer Leinwand führen kann, als eine der Hauptursachen für Craquelé. Darüber hinaus kann auch eine zu hohe Temperatur, bspw. aufgrund ungeregelter klimatischer Bedingungen am Ein- bzw. Auspackort, dazu führen, dass Farbschichten austrocknen und die beschriebenen Risse entstehen. Ebenso können mechanische Einwirkungen, die eine Dehnung des Bildträgers zur Folge haben, die Craquelé-Bildung verursachen [vgl. Palmbach 2007]. Die Schnelligkeit und das Ausmaß der Risse sind bei jedem Bild unterschiedlich. Im schlimmsten Fall können sie bis zur vollständigen Zerstörung eines Kunstwerks bzw. zu signifikantem Substanzverlust führen.

Auch sogenannte Ermüdungserscheinungen gelten als Schadensbild. Sie treten ebenfalls häufig aufgrund des Quellverhaltens der Unter- bzw. Rahmenkonstruktion des Kunstwerks auf. Die dadurch auftretende Bewegung der Unterkonstruktion führt dazu, dass der Bildträger zuerst extrem ausgedehnt wird und im Anschluss, nach Abklingen der Quellerscheinungen, sich zwar die Unterkonstruktion wieder vollständig zusammen zieht, der Bildträger jedoch nicht. Die Leinwand kann der Unterkonstruktion nicht mehr vollständig folgen, so dass eine ‚ausgedehnte' Gewebestruktur und ein nur zum Teil gespannter Bildträger zurückbleibt [vgl. Gespräch Poggendorf; Schwemer 2013].

Auch der Verlust gelockerter Malschichtschollen, die Lockerung zuvor noch fester Malschichten, brüchige Gewebekanten bzw. der Bruch einzelner, stark oxidierter Gewebefäden sowie eine durch mechanische Einwirkungen verursachte Erweiterung bereits vorhandener Risse im Gewebe gelten darüber hinaus als wesentliche Schadensbilder [vgl. Green 1991; Caldicott 1991]. Des Weiteren sind Abreibungen, sowohl an der Rahmenkonstruktion, als auch am Bildträger, welche durch Scheuervorgänge im Rahmen des Verpackungsvorgangs entstehen, zu berücksichtigen [vgl. Palmbach 2007]. Allerdings werden nicht alle der genannten Schadensbilder sofort sichtbar, sondern können unter Umständen auch als nur langfristig feststellbare Nachwirkung des Transports zum Vorschein kommen.

3.4 Definition und Ablauf eines Transportvorgangs

Die Vorbereitung und -durchführung von Kunsttransporten spielen eine große Rolle im Bezug auf die Schadensprävention. Um ein Exponat sicher an seinem Bestimmungsort abzuliefern, muss definiert werden, ab wann ein Transport vorliegt, was als Transportweg bezeichnet wird und welche Schritte bei der Transportdurchführung anfallen.

In dieser Arbeit wird der Transportweg folgendermaßen definiert: Der Vorgang beginnt mit dem Abhängen des Kunstwerks an seinem bis dato bestimmten Aufbewahrungsort und endet mit dem endgültigen Positionieren des Bildes an seinem Bestimmungsort. Im Versicherungsbereich wird hier von einem ‚Nagel zu Nagel' Transport gesprochen [vgl. Gespräch Poggendorf; Schwemer 2013].

Der Ablauf eines Transportvorgangs ist folgendermaßen zu beschreiben. Es wird ein Leihvertrag unterschrieben und zumeist ein Kurier ausgewählt, der das Bild den gesamten Transport über begleitet und auf Schäden hin untersucht bzw. diese beurteilt.

Das Bild wird mit einem Bilderwagen aus den Ausstellungsräumen ins Depot verlagert und dort von dem Personal der beauftragten Spedition mit einer Folie verpackt. Daraufhin wird es in eine Transportkiste verfrachtet und mit zwei Transporthunden zum bereitstehenden Transportfahrzeug (dieses befindet sich in einem sicheren Bereich, zumeist Tiefgaragen) gerollt. Das Personal verlädt die Kiste in den Innenraum des Fahrzeugs und befestigt sie mit Spanngurten, damit sie nicht verrutscht. Das Fahrzeug setzt sich in Bewegung und fährt zum Bestimmungsort. Dort wird die Kiste ausgeladen und abgestellt, damit sie sich an die neue klimatische Umgebung anpassen kann. Erst nach mindestens einem Tag Ruhezeit wird das Bild aus der Kiste genommen, die Folie entfernt und das Bild am Ausstellungsort aufgehängt.

3.5 Transportmittel

Der sinnvolle Einsatz unterschiedlicher Transportmittel lässt sich nur in Abhängigkeit der erwarteten Dauer (Kurz- vs. Langstreckentransport) und dem vorliegenden Transportweg (Strecken- und Landschaftsbedingungen) bestimmen. Im Rahmen von Langstreckentransporten können verschiedene Transportmittel zum Einsatz kommen. In der Regel werden längere Strecken auf dem Landweg mit LKW bzw. mit Hilfe von Schienenfahrzeugen zurückgelegt, wohingegen vereinzelt auch Frachtschiffe bzw. Fracht- und Passagierflugzeuge zum Einsatz kommen, um besonders weit entfernte Ziele zu erreichen. Der größte Anteil des Transport-

aufkommens für Kunstgegenstände entsteht jedoch auf Kurzstrecken [vgl. Gespräch Poggendorf; Schwemer 2013].

Gleichwohl ob ein Kunstwerk auf einer Langstrecke transportiert wird oder nur eine kurze Strecke zurücklegt, besteht ein Transportvorgang meist aus einem In-Haus-Abschnitt und einem Außer-Haus-Abschnitt. Die Gefahr eines Schadens bei Transporten innerhalb eines Gebäudes ist dabei keinesfalls geringer als bei einem langen Übersee-Transport. Exponate, die einen langen Transportweg vor sich haben, werden häufig sehr präzise und umfassend auf die bevorstehenden Belastungen vorbereitet, wohingegen Kurzstrecken häufig ohne große Vorbereitung zurückgelegt werden [vgl. Gespräch Poggendorf; Schwemer 2013]. Innerhalb und außerhalb des Hauses stellen Bodenbeläge einen wichtigen Einflussfaktor für einen schadensfreien Transport dar. Allerdings dient ein Bodenbelag nicht ausschließlich Transportzwecken, sondern muss verschiedenen Belastungen standhalten und unterschiedlichste Zwecke erfüllen, so dass nicht notwendigerweise immer die für einen Transport optimale Beschaffenheit berücksichtigt werden kann.

Im folgenden Abschnitt werden folglich die wesentlichen bzw. am häufigsten zum Einsatz kommenden Transportmittel im Rahmen von Kunsttransporten hinsichtlich ihrer individuellen Eignung detailliert beschrieben. Da auch in der anschließenden Versuchsdurchführung im Kapitel 4 zwischen Innen- und Außenbereich unterschieden wird, untergliedern sich die eingesetzten Transportmittel ebenfalls hinsichtlich ihres Einsatzgebietes in In-Haus und Außer-Haus.

3.5.1 Bilderwagen

Abb. 3.3: Bilderwagen

Ein Bilderwagen (vgl. Abb. 3.3) besteht üblicherweise aus einem Metallgitter, welches mittig auf einer zum Boden waagrechten geraden oder leicht schrägen Ablagefläche angebracht ist. Dabei besteht das Metallgitter, welches als Anlehnfläche bzw. Aufhängevorrichtung der zu transportierenden Bilder dient, aus einer Rechteckrohr-Edelstahlkonstruktion, welche je nach Bedarf in der gewünschten Größe angefertigt wird. Zwar besitzt Edelstahl aufgrund seiner Materialeigenschaften eine hohe Festigkeit und somit eine gute Belastbarkeit und Stabilität, sorgt aber für eine – im Kontrast zu anderen Baustoffen – relativ geringe Dämpfung [vgl. Knippers et al. 2010]. Die Ablagefläche wird hingegen häufig aus einer Spanplatte gefertigt. Spanplatten bzw. Holz werden insbesondere aufgrund ihres leichten Gewichts und der einfachen Verarbeitung eingesetzt. Zwar wäre ein Einsatz fester Kunststoffe grundsätzlich auch denkbar, jedoch aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten eher ungeeignet.

In den meisten Fällen wird die Spanplatte mit Kunststoff bezogen. Der Kunststoff, häufig aus der Gattung der Elastomere, weist positive Eigenschaften hinsichtlich der Elastizität und Rutschfestigkeit auf und bietet so optimalen Schutz und Halt. Durch die stabile ‚Weiche' des Materials können Erschütterungen besser abgefangen werden als bei einer blanken Spanplatte, da Elastomere auch bei Belastung eine hohe Dehnbarkeit aufweisen und bei Entlastung nahezu in ihren Ausgangszustand zurückkehren [vgl. Kaiser 2007]. Allerdings muss eine gewisse Materialdicke vorhanden sein, um diesen Effekt sinnvoll nutzen zu können. Die Rollen des Wagens sind in den meistens komplett aus Hartgummi gefertigt. Ein Vorteil dieser Materialwahl ist, dass der Bilderwagen einem sehr hohen Gewicht standhält, falls beispielsweise mehrere Bilder auf einmal oder ein sehr großes, schweres Bild transportiert werden sollen. Gleichzeitig sorgt ein komplett aus Hartgummi gefertigter Reifen im Gegensatz zu einer luftgefüllten Bereifung dafür, dass Unebenheiten im Bodenbereich bei einem niedrigen Belastungsgewicht schlecht abgefedert werden. Obwohl diese Problematik bekannt ist, werden aus Einfachheitsgründen für den In-Haus-Transport trotzdem meist Hartgummireifen verwendet, da bei luftgefüllten Reifen der Druck häufig überprüft und die eingefüllte Luft für die optimale Abfederung jedes einzelnen Transports (Bildgrößen- und Gewichtsabhängig) reguliert werden muss [vgl. Gespräch Poggendorf; Schwemer 2013].

3.5.2 Möbelhund

Abb. 3.4: Möbelhund

Ein Möbelhund (vgl. Abb. 3.4) oder Transportroller besteht aus einer horizontalen Platte sowie vier daran angeschraubten Rädern. Ein mittelfester Kunststoff besitzt aufgrund seiner positiven Schwingungseigenschaften eine grundsätzlich höhere Eignung – aus ökonomischen und konstruktionstechnischen Gründen wird jedoch häufig eine mit Kunststoff oder einem alternativen rutschfesten Material bezogene Holzplatte verbaut. Die Rollen werden in den Ecken der Platte mit Schrauben angebracht, sind zumeist komplett aus Hartgummi gefertigt und in alle Richtungen frei schwenkbar. Der Transportroller hat den Vorteil, dass auch ein im Verhältnis zum Eigengewicht hohes Gewicht transportiert werden kann, ohne dass unnötig menschliche Kraft in Anspruch genommen werden muss. Möbelhunde werden insbesondere dazu eingesetzt, fertig gepackte Transportkisten innerhalb von Gebäuden zu transportieren, um sie bspw. zu einem bereitstehenden LKW für den Außer-Haus Transport zu bringen.

3.5.3 Lastkraftwagen

Für den Transport außerhalb von Gebäuden werden im Rahmen von Kunsttransporten häufig Lastkraftwagen (LKW) eingesetzt. Zwar weisen Personenkraftwagen (PKW) hinsichtlich möglicher dynamischer Belastungen durch ihre konsequent auf Fahrkomfort und -stabilität ausgerichtete Konstruktion grundsätzlich eine höhere Eignung auf, kommen aber aufgrund anderer unverzichtbarer Eigenschaften nicht bzw. nur sehr selten zum Einsatz [vgl. Stühler 1987]. Infolge der Größe vieler Kunstobjekte und der fehlenden Möglichkeit, Trans-

portkisten ausreichend zu befestigen, eignet sich ein PKW nur bedingt zum Kunsttransport, da die Sicherheit des Transportgutes wesentlich durch eine fachgerechte Befestigung im Transportfahrzeug bestimmt wird [vgl. VDI 2006-09]. Darüber hinaus spielen die gefahrene Geschwindigkeit und die Motorisierung des Transportfahrzeugs bzw. die Beschleunigungsmöglichkeiten ebenfalls eine wichtige Rolle hinsichtlich der Transportsicherheit [vgl. Palmbach 2007]. Außerdem ist das Risiko, dass eine Transportkiste in einem PKW bei einem Umfall im Vergleich zu einem LKW größeren Schaden nimmt, bzw. sogar insgesamt zerstört wird, wesentlich höher. LKW sind allein aufgrund ihrer Größe und Masse um einiges sicherer.

Da einzelne Institute nur in Ausnahmefällen eigene Transportfahrzeuge besitzen, werden diese von externen Speditionen gestellt. Zur Gewährleistung eines sicheren Transports wird häufig ein Anforderungskatalog definiert, den externe Dienstleister entsprechend zu erfüllen haben. So fordert bspw. das Münchener Doerner Institut, Exponate nur mit hydraulisch- oder luftgefederten und klimatisierten Fahrzeugen zu befördern [vgl. Gespräch Poggendorf; Schwemer 2013]. Außerdem müssen die Fahrzeuge verschließbar sein und dürfen während des Transportvorgangs zu keiner Zeit unbeaufsichtigt gelassen werden.

3.6 Richtlinien zum Transport

Da jede Institution für die Pflege und den Erhalt seiner Kunstwerke selbst verantwortlich ist, werden häufig institutionseigene Leihbedingungen und Richtlinien zum Transport von Kunstwerken festgelegt. Somit sollen die zusätzlichen ‚Stressfaktoren', denen ein Kunstwerk durch Transporte ausgesetzt wird, möglichst gering gehalten werden [Richards et al. 1997]. Diese Richtlinien werden im folgenden Abschnitt beispielhaft näher erläutert.

Zum Verpackungstermin muss die beauftragte Firma mit ausreichend Personal (mind. 2 Personen), Packmaterial und passendem Werkzeug vor Ort sein. Nur ihnen bzw. Personen unter ihrer Aufsicht ist es aus versicherungstechnischen Gründen gestattet, das entsprechende Exponat ein- oder auszupacken. Jegliche Arbeitsschritte, welche nicht unter Aufsicht des Fachpersonals stattgefunden haben, sind auf ihre korrekte Durchführung hin zu überprüfen. Auch das Fahrverhalten der Spediteure während des Transports ist an die Empfindlichkeit des zu transportierenden Gutes anzupassen. Das heißt, es ist vorausschauend zu fahren, so dass beispielweise unnötiges abruptes Abbremsen oder Beschleunigen verhindert werden kann [vgl. Anhang B]. Gleichzeitig muss der Transport, falls nicht anders besprochen, auf direktem Weg zum Ziel führen. Falls eine Zwischenlagerung notwendig sein sollte, muss dies vor Transportbeginn abgesprochen und durch den Auftraggeber genehmigt werden. Auch ein eventuelles Umladen der Kiste ist anzumelden [vgl. Anhang B]

In Bezug auf die Positionierung des zu transportierenden Gegenstands im Fahrzeug ist festgelegt, dass das Bild stets senkrecht in Fahrtrichtung zu positionieren ist. Dies hat den Hintergrund, dass die vertikal zum Boden verlaufende Kraft, in diesem Fall laut Definition (vgl. Kap. 3.1.1) die z-Raumrichtung, die größte Beschleunigung z.B. durch Fahrbahnunebenheiten erfährt. Würde das Bild liegend anstatt stehend transportiert werden, wäre die Angriffsfläche für die Kraft aus der z-Richtung größer. Die Positionierung des Bildes während des Trans-

ports spielt somit eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Schadensprävention [vgl. Saunders 2005]. Keinesfalls dürfen die Korpusse gestapelt verladen werden, da gestapelte Kisten leichter kippen können und so ein höheres Beschädigungspotential für das Bild entstehen würde [ebd.].

3.7 Aufbau einer Transportkiste

Um Kunstgegenstände während des Transports bestmöglich gegenüber möglichen exogenen Schadensquellen abzuschirmen, werden speziell für Kunsttransporte entwickelte Klima- bzw. Transportkisten verwendet. Die Art der Verpackung und insbesondere die individuell auf ein zu transportierendes Kunstwerk abgestimmte Polsterung spielen dabei eine herausragende Rolle hinsichtlich der Schadensprävention. Im Folgenden werden die wesentlichen Merkmale und Eckdaten der Konstruktion, in Anlehnung an die Richtlinien des Doerner Instituts München, hinsichtlich des Standardaufbaus einer Transportkiste für Kunsttransporte dargestellt (vgl. Anhang E).

Abb. 3.5: Kistenkorpus stehend

Grundsätzlich lassen sich Klimakisten aus unterschiedlichen Materialien für diverse Formate herstellen. Die Größe und Ausgestaltung der verwendeten Kiste werden dabei stets an die individuelle Größe und das Gewicht des zu transportierenden Kunstwerks angepasst [vgl. Richards et al. 1997]. Eine Klimakiste besteht dabei immer aus einem Korpus, der mehrschichtig mit verschiedenen Materialien ausgekleidet ist. Diese dienen insbesondere der Isolation bzw. dem mechanischen Schutz des Kunstwerks.

Für die Konstruktion des Korpus bzw. der äußersten Schicht der Transportkiste wird in der Regel Sperrholz verwendet (vgl. Abb. 3.5). Zwar kommen vereinzelt auch massivere Materialien wie Metall, Aluminium und Fiberglas zum Einsatz, insgesamt hat sich Sperrholz jedoch aufgrund einer Vielzahl positiver Eigenschaften durchgesetzt [vgl. Fuesers et al. 2005]. Lediglich bei kleineren Kisten kommen die genannten ‚stabileren' Materialien noch vergleichsweise häufig zum Einsatz [vgl. Richards et al. 1997].

Sperrholz besticht durch einfache Verarbeitungsmöglichkeiten, geringe Beschaffungskosten und ein vergleichbar geringes Eigengewicht, welches insbesondere in den Handlingphasen und manuellen Teilabschnitten des Transportvorgangs zum Tragen kommt. Darüber hinaus sorgt die Eigenisolationsfähigkeit des Holzes dafür, dass Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit im Inneren der Kiste vergleichsweise konstant gehalten werden können. Dem entgegenzustellen ist zum einen die im Vergleich zu massiveren Materialien eingeschränkte Stabilität, Stoß- und Bruchfestigkeit. Zum anderen weist Holz hygroskopische Eigenschaften auf,

die bei Feuchtigkeitseinwirkung Quellvorgänge und zunehmende Instabilität des Materials nach sich ziehen.

Der Innenausbau der Korpusse besteht aus drei verschiedenen Einzelschichten (vgl. Abb. 3.6). Direkt an der Innenseite des Holzkorpus schließt eine Schicht aus Thermopur, eine aluminiumlaminierten Polyurethanschaumplatte, an. Diese dient dazu, die Dämmungs- und Stoßdämpfungsfähigkeiten der Transportkiste zu verbessern. Darüber hinaus erhöht das Thermopur die Fähigkeit, Temperaturen im Inneren des Korpus aufrecht zu erhalten und ist zudem wasserabweisend. Gleichzeitig sorgt diese zusätzliche Schicht dafür, dass etwaiger Druck, der auf dem Inhalt lastet, besser abgeleitet wird [vgl. Nanoform o.J.].

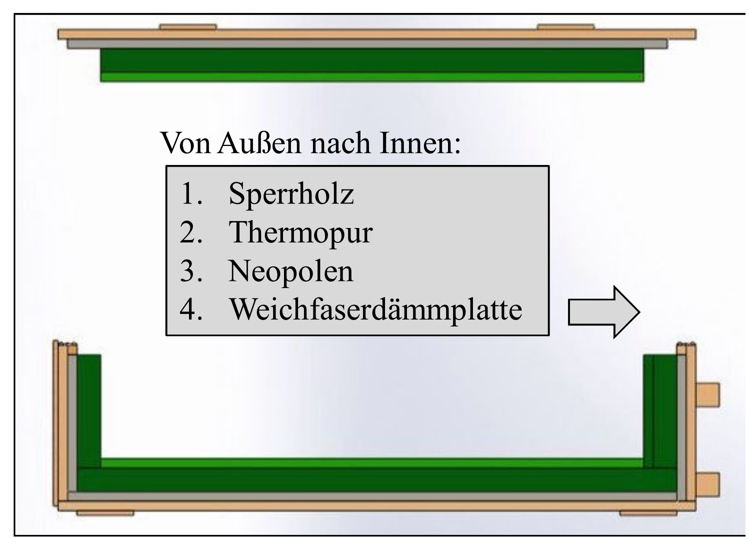


Abb. 3.6: Schichtaufbau einer Klimakiste

Darauf folgt eine, in der Regel mindestens 50 mm starke, Schicht aus Neopolen, einer mit Filz bezogenen Polyethylenschaumplatte. Neopolen nimmt wenig Wasser auf, garantiert eine gute Wärmedämmung und ist darüber hinaus in einem breiten Temperaturbereich einsetzbar. Gleichzeitig besitzt dieser Werkstoff ein isotropes Verformungsverhalten unabhängig von der Stoßrichtung und ist zu großen Teilen aus umweltfreundlichen Materialien hergestellt [vgl. BASF 2012].

Abb. 3.7: stehender Korpus, Draufsicht auf Weichfaserdämmplatte mit Filz bezogen

Die innerste Schicht der Transportkiste besteht aus einer Weichfaserdämmplatte, die ebenfalls mit Filz bezogen ist. Klimakisten werden aus wirtschaftlichen Aspekten grundsätzlich für mehrere Formate verwendet – die letzte Schicht wird jedoch individuell auf das jeweils zu transportierende Kunstwerk zugeschnitten, um möglichst optimale Transportverhältnisse zu gewährleisten. Somit variiert die Materialstärke der innersten Schicht mit der Größe des zu transportierenden Kunstgegenstandes, so dass ein fester Sitz in der Kiste und möglichst wenig Bewegungsfreiheit garantiert wird. Alle Materialien müssen aus ganzen Stücken verarbeitet werden, damit die vollkommene Funktionalität des Materials erhalten bleibt [vgl. Anhang B].

Der Deckel der Transportkiste ist nach dem gleichen Prinzip aufgebaut und wird in der Größe so angepasst, dass der Korpus luft- und wasserdicht verschlossen werden kann. Er wird mit Gummidichtungen versehen und mit insgesamt 16 Schrauben mit dem Korpus verschraubt. Zusätzlich zur Fixierung verwendete Schrauben und Klebematerialien werden stets auf der dem Bild abgewandten Seite angebracht, um eine versehentliche Beschädigung der Bildoberfläche unter jeden Umständen zu verhindern [vgl. Anhang B].

Abb. 3.8: Kistenkorpus schräge Draufsicht mit Gurten

Abschließend werden an der Unterseite des Bilds Vierkant-Holzklötze angeracht (vgl. Abb.3.6), damit der Korpus gefahrlos auch auf nassen Untergründen abgestellt werden kann, ohne dass unnötig Feuchtigkeit an den Korpus gelangt. Zusätzlich werden an den Seiten Haltegriffe fixiert, die den Transport erleichtern. Gleichzeitig bekommt das zu transportierende Kunstwerk einen Gurt zum Herausheben, welcher zwischen der Weichfaserdämmplatte und dem Kunstwerk eingesetzt wird (vgl. Abb. 3.8).

Da ein Großteil der Schäden während der Deinstallation der Kunstwerke bzw. des Ein- und Auspackens auftritt, kommt der ordnungsgemäßen Verpackung eine herausragende Bedeutung zu. Die von den Museen gestellten Anforderungen an den Verpackungsvorgang und die individuelle Ausgestaltung der Transportboxen dürfen demnach keinesfalls herabgesetzt werden [vgl. Richards et al. 1997]. Vielfach stellen Speditionen, die sich auf Kunsttransorte spezialisiert haben, derart gestaltete Transportkisten auf Anforderung zur Verfügung. Daneben bieten sie im Einzelfall auch eigens für den Kunsttransport entwickelte Spezialkisten an, wie zum Beispiel das Variosystem, welches die Stoßbelastung deutlich reduziert.

3.8 Weitere Schutzmaßnahmen

Normalerweise werden Leinwände nicht vollständig ungeschützt in den beschriebenen Klimakisten transportiert. In den meisten Fällen wird sowohl ein Rückseitenschutz, als auch ein Schutzglas sowie ein Zierrahmen angebracht [vgl. Palmbach 2007]. Diese werden im Folgenden detailliert beschrieben und gehören unabhängig vom Transport teilweise zum Kunstwerk selbst. Deshalb sollten sie auch im Rahmen von Ausstellungen grundsätzlich nicht entfernt werden.

Der Zierrahmen wird entweder als elementarer Bestandteil des Kunstwerkes schon vom Künstler selbst angebracht (nicht austausch-/optimierbar) oder erst im Nachhinein dem Kunstwerk angepasst. Rahmenkonstruktionen sind in den meisten Fällen aus lackiertem oder bemaltem Holz gefertigt. Hauptaufgabe ist es in jedem Fall, das Gemälde vor exogenen Ein-

flüssen und Stößen zu schützen. Deshalb sollte sichergestellt werden, dass alle Eckverbindungen in Ordnung sind, da der Rahmen sonst auseinander fallen könnte und somit keinen Schutz mehr darstellt [vgl. Richards et al. 1997].

Glas wurde viele Jahre lang zum Schutz der Gemälde vor physikalischer Zerstörung und gefährlichen Umwelteinflüssen, wie zum Beispiel Verschmutzung durch kleine Partikel in der Luft, verwendet [vgl. Dahlin 2010]. Während ursprünglich handelsübliches Fensterglas eingesetzt wurde, wird aufgrund des heutigen Stands der Technik meist bruchsicheres Glas bzw. Verbundsicherheitsglas benutzt, da im Falle eines Glasbruchs andernfalls große Gefahr von den Splittern ausgehen kann [vgl. Gespräch Poggendorf; Schwemer 2013]. Um mechanische Einflüsse zu reduzieren, ist es wichtig, Glas im ganzen System mit einem Zierrahmen und einem Rückseitenschutz einzusetzen [vgl. Rückseitenschutz]. Verbundglas weist heutzutage im Gegensatz zu früher eingesetztem Fensterglas ein reduziertes Gewicht auf [vgl. Saunders et al. 1994]. Bei Verbundglas handelt es sich um „zwei oder mehr Scheiben […] farblosen, gefärbten oder matten Kunststoff“ [Weber et al. 2012], die durch eine Klebeschicht, meist Polyvinylbutyral (PVB), zusammengehalten werden. „Bei der Zerstörung der Scheiben haften die Splitter an der Zwischenschicht“, was eine Beschädigung des Bildträgers vermeidet [ebd.]. PVB eignet sich aufgrund seiner Transparenz besonders zum Verkleben von Verbundglasscheiben [vgl. Knippers et al. 2012].

Der Rückseitenschutz dient als zusätzlicher Schutz empfindlicher textiler Bildträgern vor Schmutz, Luftfeuchtigkeit und mechanischen Einwirkungen [vgl. Saunders 2005; Green 1991]. Er ist in der präventiven Konservierung sehr gebräuchlich [vgl. Bäschlin et al. 2009]. Häufig wird der Rückseitenschutz aus einem biegesteifen Material hergestellt, so dass Vibrationseinflüsse, die durch den Transport aufkommen, verringert werden können. Als Rückseitenschutz verwendet man zu diesem Zweck dünne Holzbretter, Hartschaumplatten oder stark laminierte Kartonsorten. Ist der Schutz in mehreren Schichten aufgebaut, sollte der innerste Teil aus einem nicht rostenden Material, wie z.B. verchromtem Stahl oder Messing gefertigt sein [vgl. Richards et al. 1997]. Zudem wird darauf geachtet, dass Frontverglasung, Rahmen und Rückseitenschutz ein abgeschlossenes System bilden. Schwingt nämlich der Bildträger in seiner Eigenfrequenz vor und zurück, so wird eine bestimmte Menge an Luft verdrängt. Ist der Rückseitenschutz aus einem steiferen Material gewählt als der Bildträger, so besitzt er eine höhere Eigenfrequenz. Schwingt die Leinwand nun also vor und zurück und verdrängt dabei Luft, hält der Rückseitenschutz diese davon ab, auszutreten und fängt nicht selbst an zu schwingen. Vergleichbar mit einer Luftfederung wird sie abgebremst und dadurch auch die Bewegung des Bildträgers reduziert [vgl. Saunders 1998; Palmbach 2007]. Je größer ein Gemälde ist, desto größer wird sein Rückseitenschutz. Dadurch kommt es zu einer Reduzierung der Steife der verwendeten Materialien, die meistens zu einer sehr dünnen Schicht verarbeitet wurden. Die Frequenz des Resonanzbereichs wird tiefer und nähert sich immer weiter der Eigenfrequenz des Bildträgers an. Um die dämpfende Wirkung des Rückseitenschutzes erhalten zu können, wird dieser in rechteckige, kleinere Felder aufgeteilt [vgl. Palmbach 2007]. Durch eine zusätzliche Schaumstoffschicht zwischen Gemälde und Rückseitenschutz kann die Vibration weiter reduziert werden [vgl. Richards et al. 1997].

Abb. 3.9: Bild in PE-Folie eingepackt in Klimakiste

Zusätzlich zu den beschriebenen ten wird das Kunstwerk in der Regel in eine Polyethylen-Folie (PE-Folie) eingewickelt (vgl. Abb. 3.9) und luftdicht mit Klebeband verschlossen. PE-Folie ist milchig-trüb, matt, nahezu wasserundurchlässig und ist aufgrund positiver Falt- und Knickeigenschaften gut zu verarbeiten [Gespräch Poggendorf; Schwemer 2013]. Außerdem ist sie im Vergleich zu anderen Folien sehr kostengünstig zu produzieren.

3.9 Vorhandene Messsysteme

Um die beschriebenen Gefahrenquellen in Form klimatischer und mechanischer Einflüsse feststellen zu können, sind diese genau zu erfassen und auszuwerten. Nur so können schädliche Einwirkungen detektiert und entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen werden [vgl. Begov et al. 2007].

Zu diesem Zweck wird spezielle Messtechnik benötigt. Dabei sind besonders Geräte interessant, die mechanische –, im Idealfall in allen drei Raumrichtungen – sowie klimarelevante Messdaten aufnehmen können. Die daraus entstehende Historie messbarer Einflüsse auf ein Bild, hilft dabei, Schäden auf ihre möglichen Ursachen zurückzuführen und die richtigen restauratorischen Maßnahmen einzuleiten.

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich dabei auf Geräte, die eine kabellose Anbringungsmöglichkeit bieten und legt den Fokus dabei allein auf in diesem Kontext relevante Messwerte. Eigenschwingungen der Leinwand im Vorfeld zu messen wäre interessant, allerdings steht der Aufwand in Bezug auf das Ergebnis dazu aus folgenden Gründen in keinem Verhältnis. Die Gerätschaften müssten zur Messung der Eigenschwingung direkt an der Leinwand angebracht werden. Aus Empfindlichkeitsgründen ist dies aber bei so gut wie keinem Bild möglich. Deshalb müssen Dummies, welche dem Original in seiner Beschaffenheit so nahe wie möglich kommen, für jedes einzelne Kunstwerk (aufgrund deren Einzigartigkeit) angefertigt werden. Da die Farbschichten aber meistens nicht genau zu reproduzieren und auch die Leinwandspannung nicht exakt nachempfunden werden kann, ist dies unmöglich. Deshalb werden Eigenschwingungen normalerweise nicht gemessen [vgl. Anhang A]. Licht bzw. UV-Strahlung spielen in Rahmen von Transportvorgängen eine eher untergeordnete Rolle, da die Gemälde während der gesamten Transportphase kaum in Berührung mit Licht treten. Temperatur und Luftfeuchtigkeit haben zwar prinzipiell eine hohe Überwachungsrelevanz, können aber durch den spezifischen Aufbau der Klimakisten weitestgehend reguliert werden (vgl. dazu Kapitel 3.7). Somit besitzen insbesondere Datenlogger, die mechanische Einwirkungen in alle drei Raumrichtungen im Rahmen von Transportvorgängen aufzeichnen können eine herausragende Relevanz.

Als Datenlogger kann eine prozessorgesteuerte Speichereinheit (Hauptteil einer Datenverarbeitungsanlage), die Daten in einem bestimmten Rhythmus (punktuell oder kontinuierlich) über eine Schnittstelle aufnimmt und auf einem Speichermedium (in digitaler oder nichtelektronischer Form) ablegt, bezeichnet werden. Der Aufbau eines Datenloggers besteht aus einem programmierbaren Mikroprozessor, einem Speichermedium (z.B. fest integrierte Speicher oder SD-Karten) und mindestens einer Schnittstelle. Liegt die Schnittstelle in externer Form vor, kann diese zur Abgabe der Daten sowie zum Anschluss der Datenquelle (Sensoren etc.) dienen. Liegt eine interne Schnittstelle vor (Datenlogger bildet mit Sensor eine Einheit) so muss ebenfalls eine externe Schnittstelle zur Datenabgabe an den PC vorhanden sein (z.B. USB). Für den Kunsttransport ist ein Datenlogger mit integrierten Sensoren sinnvoll, da zusätzliche Sensoren in der Anbringung aufwendiger sind und ein höheres Schädigungspotential in Bezug auf die Befestigung am Kunstgegenstand mit sich bringen [vgl. Avisaro AG o.J.].

Um herauszufinden, welche sich auf dem Markt befindenden Datenlogger im Bezug auf die Überwachung von Kunsttransporten eignen, wurden zu beachtende Auswahlkriterien festgelegt. Die wichtigsten Kriterien waren, dass der Datenlogger mechanische Einwirkungen in drei Raumrichtungen messen kann und eine kabellose Betriebsweise besitzt. Die im Folgenden näher beschriebenen zwei Modelle erfüllen diese Anforderungen und wurden deshalb auf ihr weiteres Leistungsbild hin untersucht. Der MSR165, hergestellt von der Firma MSR Electronics GmbH, ist ein Datenlogger bei welchem alle gewünschten Überwachungsgrößen aufgezeichnet und alle technischen Voraussetzungen, wie z.B. implizite Datenaufnahme, vorhanden sind [vgl. MSR Electronic GmbH 2008]. Darüber hinaus eignet sich das Gerät insbesondere aufgrund seiner handlichen Größe, die ein Anbringen direkt am Kunstwerk erleichtert. Das ArtGuardian Gesamtsystem, entwickelt von der Fraunhofer-Gesellschaft, ist ein Messkonzept zur Überwachung von Kunsttransporten. Einzelne Sensormodule (mehrere, nicht zusammenhängende Sensoren, kein kompakter Logger) werden direkt am Kunstwerk angebracht, wobei die Messwerte kabellos von den Sensoren über eine elektronische Basisstation/Repeater an die ArtGuardian Plattform geleitet werden [vgl. Fraunhofer Institut et al. o.J.]. Im Gegensatz zum MSR165 handelt es sich bei dem ArtGuardian also um kein einzelnes konkretes Gerät sondern um ein Gesamtsystem aus mehreren Bestandteilen.

Nach Vergleich der Leistungsbilder der zur Auswahl gestandenen Geräte sowie einer Analyse ihrer individuellen Eignung im Rahmen von Kunsttransporten fokussiert die vorliegende Arbeit den MSR165, da dieser den vollständigen Anforderungskatalog erfüllt. Zwar würde das Konzept ArtGuardian aufgrund der beschriebenen Eigenschaften ebenfalls eine relativ hohe Eignung zur Überwachung von Kunsttransporten besitzen, musste jedoch aufgrund zum Messzeitpunkt nicht vorhandenen Prototypen ausgeschlossen werden.

4 Praktischer Teil

Ziel dieser Arbeit ist es, Schock- und Vibrationsereignisse während eines Transportvorgangs zu messen und im Anschluss auszuwerten. Um verwertbare Versuchsergebnisse zu erhalten und einen logischen Versuchsaufbau zu gestalten, müssen die zuvor beschriebenen Leistungen des Datenloggers MSR165 überprüft werden, um daraus geeignete Einstellungen für die durchzuführende Transportüberwachung festzulegen. In den folgenden Abschnitten wird die verwendete Messtechnik beschrieben, die technische Möglichkeit des Datenloggers detailliert erläutert, die vorhandenen Einstellungsmöglichkeiten (Programmwahl) genannt sowie Testversuche auf Grundlage des Datenblattes des Herstellers durchgeführt, um letztendlich Schlüsse auf die Parametereinschränkungen zu ziehen. Daraufhin folgen die Beschreibung des durchgeführten Versuchs, der Messaufbau, die Erläuterung der Messmethodik, die Auswertung der Ergebnisse und deren Interpretation.

4.1 Verwendete Messtechnik

Bei dem verwendeten Messgerät handelt es sich um ein digitales Gerät, in dem ein ADXL345 Chip (MEMS Accelerometer) verbaut wurde [vgl. Analog Devices 2009]. Die integrierten Beschleunigungssensoren können für einen Messbereich von ±15 *g* (1 *g* = 9,81 m/s²), bis zu einer Genauigkeit von ±0,15 *g* in drei Raumrichtungen Daten aufzeichnen [vgl. MSR Electronic GmbH 2008]. Beschleunigungen können in ihren statischen und dynamischen Wert aufgeteilt werden, wobei der MSR165 beide Dimensionen aufzeichnet. Der statische Wert, angegeben in der mittleren Erdbeschleunigung, gibt Aufschluss über die Sensorlage im Raum. Der dynamische Wert gibt die Geschwindigkeitsänderung des Sensors an.

Das Gehäuse des Datenloggers besteht laut Datenblatt aus eloxiertem Aluminium und ist weitgehend unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen (wasserdicht). Durch seine kompakte Größe von 39x23x72 mm im Vergleich zu anderen, im Rahmen von Kunsttransporten eingesetzten Datenloggern (u.a. der MoniLOG mit 70x105x25 mm) und seinem vergleichsweise geringem Gewicht von 69 g erlaubt der MSR165 eine einfache Handhabung und eine gute schwingungstechnische Ankopplung an das Transportgut. Die Stromversorgung erfolgt über einen handelsüblichen, vor allem im Modellbau eingesetzten, Lithium-Polymer-Akku mit 900 mAh, welcher über einen USB-Anschluss geladen werden kann.

Die Speicherkapazität beträgt laut Datenblatt über 2.000.000 Messwerte, wobei ein Messwert 13 Bit des Gesamtspeicherplatzes verbraucht. Gemäß den Angaben im beigefügten Datenblatt kann das Gerät mit einer zusätzlichen Speicherkarte ausgestattet werden, so dass insgesamt ca. 1 Milliarde Messwerte aufgezeichnet werden können. Alle aufgezeichneten Messdaten werden dabei stets mit Datum und Uhrzeit versehen. Die maximale Genauigkeit der im Rahmen der Messung aufgezeichneten Messwerte beschränkt sich auf Sekunden. Dies bedeutet, dass eine höhere Granularität [Millisekunden] nur durch manuelles Umrechnen angegeben werden kann. Nach jedem Einsatz sollten die gespeicherten Daten ausgelesen und der Datenlogger formatiert werden. Zwar ist der Speicherplatz, welcher zur Verfügung steht, abhängig von der Aufzeichnungslänge und den weiteren Einstellungen wie Abtastrate etc., aber um

keine Gefahr zu laufen, dass bei der nächsten Messung zu wenig Speicherplatz vorhanden ist, ist eine Formatierung sinnvoll.

Die Datenbearbeitung außerhalb des MSR165 kann mit Hilfe des MSR-Programms, einer Software vom Hersteller, auf einem PC durchgeführt werden. Die MSR-Software kann Daten auslesen, darstellen und speichern sowie das Gerät für neue Messungen konfigurieren. Neben einem Übersichtsprotokoll können alle Messwerte in Kurven- und Tabellenform angezeigt und bei Bedarf zugeschnitten und ausgedruckt werden. Messwerte können als Textdatei (*.csv) dargestellt und so in Excel exportiert werden. Sie lassen sich als Messkurve oder als Tabelle mit jedem einzelnen vorhandenen Wert darstellen. Mit Hilfe der Einstellungsoption ‚Online' können die aufgezeichneten Daten schon während der laufenden Messung am PC betrachten werden.

4.2 Programmwahl

Im Programmpunkt ‚Setup' können die gewünschten Randbedingungen, wie zum Beispiel die Abtastrate bei Schwingungsmessungen oder aber ein im Rahmen der anstehenden Messungen zu berücksichtigender Schwellenwert, eingestellt werden. Grundsätzlich ist zwischen den Programmeinstellungen ‚Vibrationsmessung' und ‚Schockmessung' zu unterschieden.

4.2.1 Vibrationsmessung

Der MSR165 erlaubt die Aufzeichnung von Vibrationen, was in diesem Fall eine kontinuierliche Aufzeichnung ohne Rekordlimit/Schwellenwert bedeutet. Als einheitlich für alle drei Raumrichtungen einstellbare Abtastfrequenz sind 25, 50, 100, 200, 400, 800 oder 1.600 Hz wählbar. Der größte Vorteil der Vibrationsmessung liegt in der lückenlosen Aufzeichnung der Ereignisse, so dass stets alle Messwerte gespeichert werden. Sollte der Speicherplatz im Rahmen der Vibrationsmessung aufgrund einer zu hohen Anzahl an Messwerten verbraucht sein, erlaubt die Möglichkeit der ‚Ringspeicherung' eine kontinuierliche Aufzeichnung. In diesem Zusammenhang ist darauf zu achten, dass die jeweils ältesten Messdaten überschrieben werden, so dass eventuell relevante Messdaten verloren gehen können. Hier liegt auch der wesentliche Nachteil des MSR165, denn aufgrund der limitierten Speicherkapazität lassen sich kaum längere Aufzeichnungen als 15 Minuten (bei einer Abtastrate von 1.600Hz) durchführen (vgl. Kap. 4.3.2).

4.2.2 Schockmessung

Das Gerät lässt sich auch als sogenannter ‚Event-Recorder' verwenden, wobei wie bei der Vibrationsmessung eine gemeinsame Abtastrate für alle drei Beschleunigungsrichtungen festzulegen ist. Im Rahmen der Schockmessung zeichnet das Gerät nur dann Messwerte auf, wenn ein zuvor für alle drei Achsen gemeinsam festgelegter Schwellenwert überschritten wird. Dabei werden immer die 32 vor dem Erfüllen der Aufzeichnungsbedingung und die 100 Messwerte nach dem ‚Event' aufgezeichnet, worin auch ein zentraler Vorteil der Schockmessung gegenüber der Vibrationsmessung liegt, da nur die gewünschten Messwerte Speicherkapazität belegen. Diese Programmeinstellung dient nicht nur der Energieeinsparung, sondern

nutzt den vorhandenen Speicherplatz optimal aus, ohne dass Ereignisse überspeichert werden. Durch diese Fokussierung auf bestimmte Messwerte geht jedoch der Gesamtüberblick (aufgrund des eingestellten Schwellenwertes wird erst ab einer bestimmten Beschleunigung aufzeichnet) über den Transport verloren.

Wurde eine Programmeinstellung gewählt, wird ein Startzeitpunkt der Messung festgelegt. Zur Auswahl stehen ein sofortiger Start, ein Start mittels Betätigung des Tasters sowie ein Aufzeichnungsstart durch Eingabe einer genauen Uhrzeit. Ein sofortiger Start hat den Vorteil, dass eine blau blinkende Kontrollleuchte die Überprüfung der Aktivität des Datenloggers erleichtert. Allerdings muss die Aufzeichnung stets am selben PC gestoppt werden, der auch zur Aktivierung der Messung verwendet wurde, d.h. ein Laptop muss mitreisen. Außerdem müssen messirrelevante Daten, die beim Abnehmen des Datenloggers entstehen, entfernt werden. Bei der Starteinstellung mit Datum und Uhrzeit (VORSICHT: richtet sich nach den Systemeinstellungen des zur Konfiguration verwendeten PCs) kann als Vorteil gewertet werden, dass nur relevante Transportereignisse aufgezeichnet werden. Wenn ein Transportvorgang allerdings unpünktlich beginnt/endet, können wichtige Messdaten verloren gehen. Von der Möglichkeit des Starts der Messaufzeichnung mit dem Taster ist abzuraten, da er bei den durchgeführten Testmessungen unzuverlässig funktioniert hat.

4.3 Definition des verwendeten Koordinatensystems

Bevor Messwerte mit dem Datenlogger MSR 165 aufgezeichnet werden können, muss zuerst eine allgemeine Definition des verwendeten Koordinatensystems stattfinden. Während aller durchgeführten Messungen sind sowohl das Sensorkoordinatensystem (fix definierte Achsen des Datenloggers) sowie das absolute Koordinatensystem (vgl. Kap. 3.1.1) vorhanden. Während die Richtungen des absoluten Koordinatensystems im Bezug auf die zum Boden wirkende Erdbeschleunigung immer gleich bleiben, verändern sich die Richtungen des Sensorkoordinatensystems mit Bewegung bzw. Verlagerung der Transportkiste oder des Bildes (vgl. Abb. 4.1 und 4.2). Für eine bessere Vergleichbarkeit der Messwerte bezieht sich deren Auswertung stehts auf das absolute Koordinatensystem (vgl. Abb. 3.2). Die Messwerte des Sensorkoordinatensystems sind entsprechend anzupassen, so dass die Richtung mit der statischen Komponente immer der z-Raumrichtung des absoluten Koordinatensystems (in Richtung der Erdbeschleunigung wirkend) entspricht.

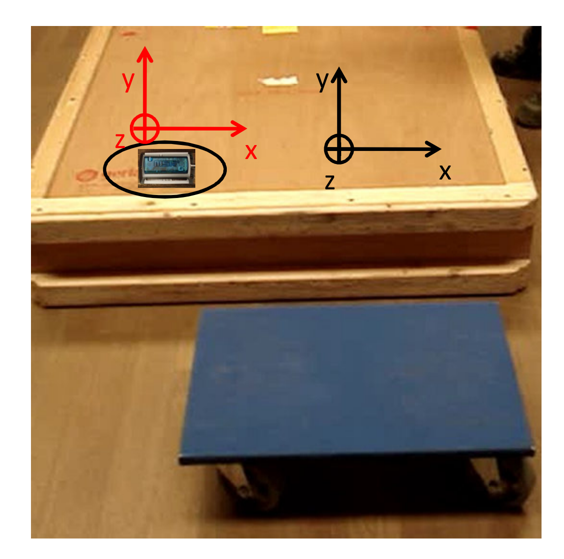


Abb. 4.1: Sensorkoordinatensystem und absolutes Koordinatensystem sind gleich

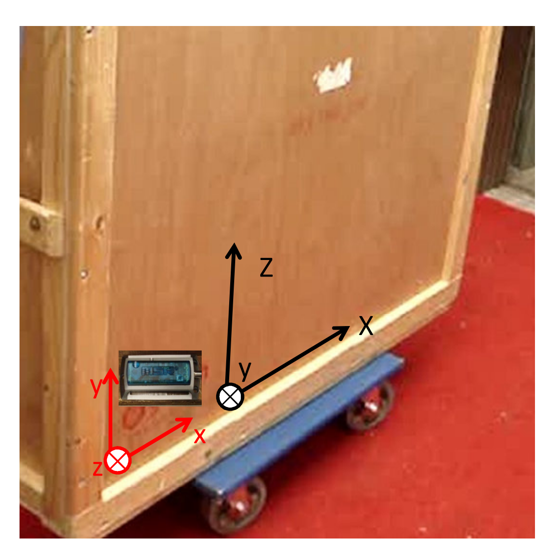


Abb. 4.2: Sensorkoordinatensystem passt sich Verdrehung des Bildes nicht an

4.4 Vorversuche

Bevor die Überwachung eines real stattfindenden Transportvorgangs beginnen kann, müssen Vorversuche durchgeführt werden. Mit Hilfe eines TiePie (digitales Oszilloskop) mit angeschlossenem, kalibrierten Beschleunigungssensor des Modells PCB 356A02, soll die Genauigkeit der Messergebnisse des MSR165 im Vergleich festgestellt werden. Daraufhin wird der vorhandene Speicherplatz des Datenloggers im Bezug auf die Aufzeichnungsdauer untersucht, damit eine geeignete Programmwahl festgelegt werden kann. Außerdem wird eine sinnvolle Platzierung des Datenloggers am Transportgut ermittelt. Dafür werden mehrere Anbringungsorte auf ihre individuelle Eignung getestet.

4.4.1 Genauigkeit des Messgeräts

Bevor die Aufzeichnung starten kann, ist es – sofern möglich – sinnvoll, den MSR165 mit einem kalibrierten Messgerät auf seine Empfindlichkeit hin zu überprüfen [vgl. DIN 1319-1 2012]. Zu diesem Zweck wurde ein kalibrierter Beschleunigungssensor des Modells PCB 356A02, welcher die Geschwindigkeitszunahme in 3 Raumrichtungen (dynamische Beschleunigung) misst, an einen TiePie angeschlossen. Der Datenlogger wurde in diesem Fall auf eine Vibrationsmessung mit einer Abtastrate von 1.600 Hz eingestellt (3 Beschleunigungssensoren welche statische und dynamische Beschleunigung messen waren aktiv). Im gleichen Rahmen liegende Einstellungen wurden auch für den TiePie mit dem angeschlossenen PCB 356A02 vorgenommen, allerdings liegt die aufgezeichnete Einheit bei Volt und muss für einen Vergleich der Messergebnisse in g umgerechnet werden.

Daraufhin wurden sowohl der Datenlogger als auch der PCB 356A02 auf einem rechteckigen Stahlklotz mit doppelseitigem Klebeband befestigt. Dieser wurde auf eine Tischplatte gelegt

Abb. 4.3: Metallkoltz mit PCB 356A02 und MSR 165

(vgl. Abb. 4.3). Mit einem pulshammer wurden gen erzeugt. Obwohl der MSR165 selbstständig zu jedem Messwert eine genaue Uhrzeit aufzeichnet, musste die Dauer der Anregung erfasst werden, da das Vergleichsmessgerät (TiePie mit PCB 356A02) die Uhrzeit nicht automatisch zu jedem Messwert mit aufzeichnet, sondern nur den Auslösezeitpunkt der Schwellenwertüberschreitung angibt. Da der Metallklotz nahezu waagerecht auf dem Versuchstisch positioniert war und die z-Richtung mit dem Impulshammer angeregt wurde, wird auch nur diese ausgewertet. Anhand des vorliegenden Diagramms der Anregung kann man erkennen, dass die Maximalamplitude beim Vergleich der trendbereinigten Reihen sich auf einem vergleichbaren Niveau bewegt. Während der MSR165 einen Wert von 4,57 *g* (vgl. Abb.4.4) anzeigt, liegt die Maximalamplitude (vgl. Abb. 4.5) des TiePie bei 4,65 *g*. Das entspricht einer Abweichung von circa 1,75 %. Da der Datenlogger eine Ungenauigkeit von +/- 0,15 *g* voraussagt, liegt dieser Wert in einem akzeptablen Rahmen. Im Schwingungsbild lässt sich feststellen, dass beide einen fast identischen Schwingungsverlauf aufweisen. Die Genauigkeit des Datenloggers MSR165 wird ebenfalls durch die Mittelwertabweichung von unter 0,001 % bestätigt.

VORVERSUCH | – GENAUIGKEIT DES MESSGERÄTS

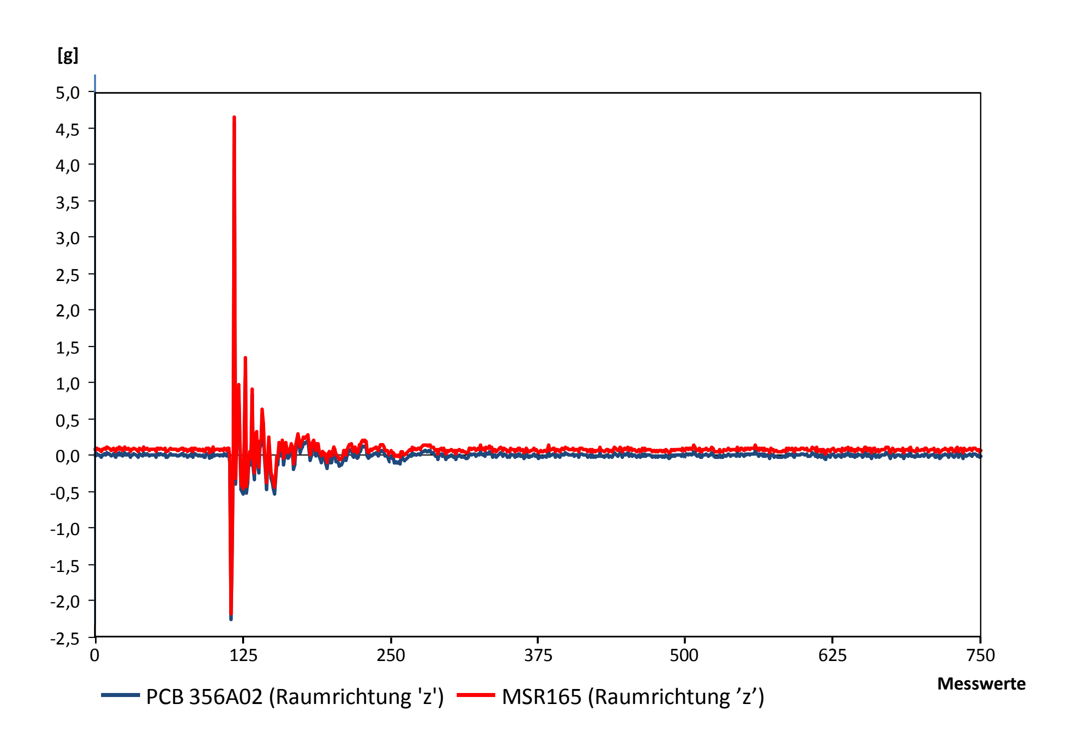


Abb. 4.4: MSR 165 und PCB 356A02 z-Raumrichtung übereinander gelegt

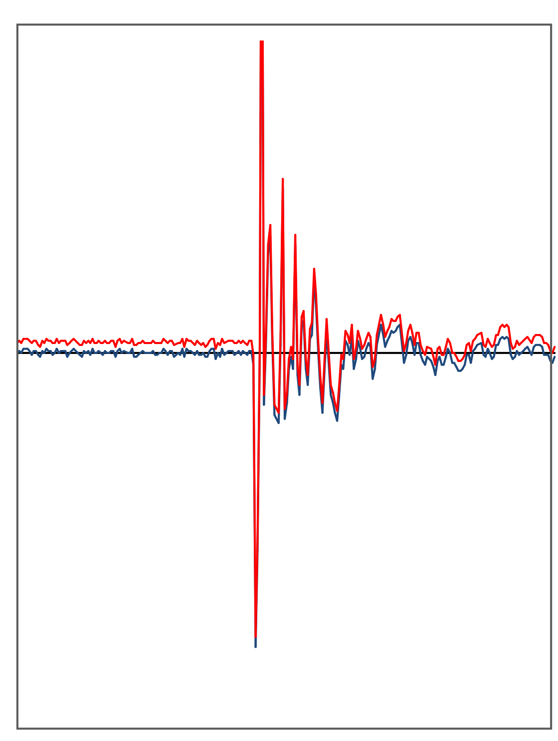


Abb. 4.5: Zoom auf Maximalamplituden (vgl. Abb. 4.4)

4.4.2 Speicherkapazitätsermittlung

Testläufe mit verschiedenen Programmeinstellungen sollen aufzeigen, wie viele Messwerte real erfasst werden können. Auch die zeitliche Begrenzung einer Aufzeichnung, verursacht durch einen vollen Datenspeicher, ist von Relevanz, da sich ein Kurzstreckentransport durch eine Transportdauer von rund 60-180 Minuten auszeichnet und dieser im Idealfall von Anfang bis Ende erfasst werden soll. Im ersten Testlauf wurde die Programmeinstellung ‚Vibration' mit einer maximalen Abtastrate von 1.600 Hz (Limit des Datenloggers) gewählt. Auf Basis dieser Einstellungen und der im Datenblatt angegebenen Messparameter wurde die maximal mögliche Aufzeichnungsdauer ermittelt. Daraufhin wurde zum Vergleich eine reale Messung durchgeführt.

Mit den Angaben aus dem vorliegenden Datenblatt des Datenloggers wurde berechnet, dass dieser in der Lage ist, maximal 7 Minuten kontinuierlich Daten aufzuzeichnen. Die 7 Minuten errechnen sich folgendermaßen. In alle drei Raumrichtungen werden pro Sekunde 1.600 Werte aufgezeichnet. Das heißt, 1.600*3 = 4.800 [Messwerte/sek]. Um eine Aufzeichnungsdauer in Minuten zu erhalten, müssen die 4.800 [Messwerte/sek] mit 60 [sek/min] multipliziert werden. Daraufhin werden die zur Verfügung stehenden 2.000.000 Messwerte durch 288.000 [Messwerte/min] dividiert. (2.000.000 [Messwerte]/(1.600*3[Messwerte/sek]* 60 [sek/min]) = ~ 7 Min). Um diesen theoretisch ermittelten Wert zu überprüfen, wurde eine Vergleichsmessung durchgeführt, die erst nach 15 Minuten aufgrund eines vollen Datenspeichers unterbrochen wurde. Somit zeichnete das Gerät im Vergleichsversuch mit ca. 4.000.000 gespeicherten rund 50 % mehr Messwerte, als im Datenblatt angegeben, auf. Dies liegt laut Herstellerauskunft daran, dass das vorliegende Datenblatt nicht dem aktuellsten Stand entspricht (Emailkontakt zu Herrn Marc Schetter am 04.07.13). Um zu überprüfen, ob das Ende der Vergleichsmessung wirklich durch einen vollen Datenspeicher ausgelöst wurde, ist in einem zweiten Versuch die Abtastrate ceteris paribus auf 800 Hz herabgesetzt worden. Das Gerät zeichnete in diesem Fall 30 Minuten auf, wodurch sich die oben genannte Hypothese bestätigen lässt, das doppelt so viele Messwerte aufgezeichnet werden können.

Somit ist je nach Zielsetzung der Messung die entsprechend passende Abtastfrequenz festzulegen. Diese ergibt sich aus dem Niquist-Shannon-Abtasttheorem (vgl. Kap. 3.1.1). Um Schwingungen möglichst genau erfassen zu können, sollte eine möglichst hohe Abtastrate eingestellt werden. So wurden in vorangegangenen Schwingungsversuchen, unter anderem im Rahmen der von Herrn Cornelius Palmbach an der Fachhochschule Bern durchgeführten Messungen, weitaus höhere Abtastfrequenzen gewählt. Die Abtastfrequenz lag bei diesen Versuchen bei 10.000 Hz, so dass die Abtastrate mit 10.000 Messwerten pro Sekunde im Kontrast zum verwendeten Datenlogger MSR165 mit einer maximalen Abtastrate von 1.600 Hz vergleichsweise höher liegt.

Um die Speicherkapazität im Programm ‚Schock' mit der im vorangegangenen Abschnitt ermittelten maximalen Aufzeichnungsdauer vergleichen zu können, wurde in einem weiteren Vergleichsversuch ebenfalls eine Abtastfrequenz von 1.600 Hz angesetzt. Der Schwellenwert wird dabei auf die niedrigste Einstellungsmöglichkeit, welche 2 *g* beträgt (vgl. Kap. 4.5), ein-

gestellt. Geht man nun davon aus, dass der Datenlogger im Schnitt einmal pro Sekunde den Schwellenwert überschreitet und somit Messwerte aufzeichnet (in der Realität löst er teilweise sogar nur 1 Mal pro Minute aus), lässt sich eine maximale Aufzeichnungsdauer von 83 Minuten und 45 Sekunden errechnen. Diese ist in jedem Fall deutlich höher als bei einer Vibrationsaufzeichnung, so dass sich die Einstellung ‚Schock' insbesondere im Rahmen von Kunsttransporten anbietet.

4.4.3 Erörterung der Sensorplatzierung

Um die Schwingungen, die auf die Leinwand wirken, möglichst genau abbilden zu können, ist ein geeigneter Anbringungsplatz für den Datenlogger zu identifizieren. Vier verschiedene Möglichkeiten können in Betracht gezogen werden [vgl. Emailkontakt zu Herrn Cornelius Palmbach am 14.05.2013].

1. Außenseite der Klimakiste
2. Innenseite der Klimakiste
3. Innerhalb der Klimakiste, am Verpackungsmaterial der Leinwand (PE-Folie)
4. Innerhalb der Klimakiste, rückseitig an der Leinwand (Zierrahmen)

Eine Anbringung des Datenloggers an der Außenseite der Transportkiste bietet den Vorteil, das Gerät und seine Funktionstüchtigkeit jederzeit beobachten zu können. Gleichzeitig führt dies aber dazu, dass durch den Schichtaufbau der Kiste und die eingeschränkte Schwingungsübertragung der verwendeten Materialien die Intensität von Stößen und Vibrationen, welche an der Außenseite der Kiste gemessen wurden, im Inneren stark reduziert wird. Saunders [1998] bewies in Vergleichsmessungen, dass das Verpackungsmaterial die Stöße signifikant abdämpft. In einem Beispielversuch, bei welchem zwei identische Datenlogger innerhalb (Emissionsort) sowie außerhalb (Immissionsort) der Kiste angebracht wurden, konnte dies bestätigt werden. So zeigte der außen angebrachte Datenlogger Schocks bis 9 *g* an, während der im Inneren befestigte zum gleichen Zeitpunkt einen Schock von weniger als 3 *g* aufzeichnete [vgl. Saunders 1998]. Eine Anbringung außerhalb der Kiste ist für die Überprüfung der Dämpfungswirkung des Verpackungsmaterials vorteilhaft, für die Stoßermittlung am Kunstwerk selbst, welche in dieser Arbeit behandelt wird, aber nicht zu empfehlen.

Im Inneren der Klimakiste bieten sich mehrere Möglichkeiten, den Datenlogger zu befestigen. Neben einer Anbringung an der Innenseite der Klimakiste kann das Messgerät sowohl an der Verpackung der zu transportierenden Leinwand (PE-Folie), als auch direkt am Kunstwerk (rückseitig am Zierrahmen) fixiert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Messergebnisse je unverfälschter sind,desto näher der Datenlogger am Kunstwerk selbst angebracht ist. So ist eine Positionierung des Datenloggers an der Innenseite der Kiste nicht zu empfehlen. Eine Anbringung an der Verpackungsfolie ist ebenso zu vermeiden, da dort zu viele Eigenbewegungen des Datenloggers aufgrund der geringen Steifigkeit der Folie aufgezeichnet würden. So stellt eine Anbringung des Datenloggers direkt an der Rückseite des Gemäldes die optimalen Voraussetzungen, möglichst unverfälschte Messergebnisse zu erhalten, dar. Die Befestigung am Zierrahmen muss jedoch stets mit den zuständigen Restauratoren abgesprochen wer-

den, um mögliche Beschädigungen des Kunstwerks auszuschließen. Es empfiehlt sich, den Datenlogger mit doppelseitigem Klebeband zu fixieren, da sich dieses rückstandslos entfernen lässt und keinen sichtbaren Eingriff am Zierrahmen darstellt.

4.5 Parameterwahl

Um die Parameter für die durchzuführende Messung final festzulegen, werden die Ergebnisse der im vorausgehenden Kapitel beschriebenen Vorversuche herangezogen und mit Erkenntnissen aus der Fachliteratur kombiniert. Neben der Sensorplatzierung, dem Startzeitpunkt der Messung und der Auswahl eines Messprogramms (Schock vs. Vibration) ist ein Schwellenwert zu definieren. Auf Basis der Vorversuche lassen sich bereits folgende Einstellungen festhalten:

Programmstart: Wie im Kapitel 4.2.2 beschrieben, bietet sich ein sofortiger Aufzeichnungsstart aufgrund der höheren Verlässlichkeit der Aufzeichnung an.
Programmwahl: Nachdem im Kapitel 4.4.2 die maximal mögliche Speicherkapazität und damit Aufzeichnungsdauer für beide Programme identifiziert wurde, ist die Einstellung ‚Schock' zu wählen, da maximal 15 Minuten Messdauer im Modus ‚Vibration' zu wenig Zeit sind, um einen Transportvorgang vollständig zu dokumentieren.
Sensorplatzierung: Als Ergebnis des im Kapitel 4.4.3 beschriebenen Vorversuchs ist der Datenlogger direkt am Zierrahmen der Leinwand anzubringen.
Die weiteren Einstellungen des MSR165 beziehen sich auf Erkenntnisse aus der Literatur, die in Versuchen mit einem ähnlichen Versuchskonzept gewonnen wurden, aber nicht selbst überprüft werden konnten.
Dabei bezieht sich die Wahl Schwellenwertes auf fachbezogene Literatur. Aus dieser geht hervor, dass sich Schwingungsamplituden während des durchzuführenden Kunsttransports im Bezug auf kontinuierlich auftretende Vibrationen zwischen 5-10 m/s² (0,5-1 *g*) [vgl. Marcon 1991] und bei Schockevents zwischen 30-80 m/s² (3-8 *g*) [vgl. Saunders 1998] aufhalten. In seinen Messungen hat Stühler [1987] herausgefunden, dass das Fahren mit luftgefederten LKW eine Belastung zwischen 0,45-1,05 *g* verursacht. Saunders [1998] stellte ebenfalls Messungen zum Transport an und fand heraus, dass die Be- und Entladephase die heftigsten Schockevents, mit einem Beschleunigungswert von bis zu 2,2 *g* (z-Raumrichtung) bei Kurztransporten verursachen. Der dazugehörige LKW-Transport wies hingegen nur Werte mit einer Maximalamplitude von 0,5 *g* auf [vgl. Saunders 1998]. Begov und Kuschel [2007] kamen bei Vergleichsmessungen zu dem Schluss, dass die Maximalwerte während der Handlingphase des Kunstwerks durch Menschenhand aufkommen und eine Maximalamplitude von 2,5 *g* (z-Raumrichtung) aufweisen.
Um die üblich auftretenden Messwerte aufzeichnen zu können, wurde der MSR165 deshalb auf seinen geringstmöglichen Schwellenwert von 2 *g* eingestellt. Da der MSR165 die statische Beschleunigung generell mit aufzeichnet, bedeutet dies, dass eine dynamische Belastung ab einem Schwellenwert von 1 *g* gemessen wird (in der z-Raumrichtung wird die Erdbeschleunigung für unverfälschte Werte in der Auswertung abgezogen). Bei den in der Literatur verwendeten Messgeräten ist nicht bekannt, ob die Datenlogger die statische Beschleunigung

mit aufzeichnen. Auf Grundlage der vorangegangenen Messungen sollte dieser nicht oft überschritten werden.
Zum Gefahrenpotential hoher Messwerte gehen die Meinungen auseinander. Thickett [2002] kam zu dem Schluss, dass bei sich immer wiederholenden Vibrationen und Erschütterungen von 2 bis 6 m/s², also 0,2 bis 0,6 *g* bereits sichtbare Beschädigungen an einem Gemälde auftreten können. Hingegen behauptet Mecklenburg [et al. 1991] in seinem verwendeten Simulationsmodell, dass Vibrationen bis zu 100 m/s², also 10 *g* ein sehr geringes Schadenspotential darstellen. Mit 1 *g* orientiert sich der Schwellenwert der z-Beschleunigung also eher an Thickett [2002].
Die Länge der aufgezeichneten Messwerte einer Schwellenwertüberschreitung liegt bei 132 Messwerten. Die meisten Messvorgänge dauern so bei einer Abtastrate von 1.600Hz nur einen Bruchteil einer Sekunde, um genau zu sein 82,5 Millisekunden an.

4.6 Versuchsaufbau

Abb. 4.6: Anbringung des MSR165 an der Rückseite des Zierrahmens

Für den Versuchsaufbau werden neben dem verwendeten Datenlogger (MSR165) ein Laptop mit der vorinstallierten MSR-Software und doppelseitiges Klebeband benötigt. Der Datenlogger wurde vor dem Transport am Laptop konfiguriert, Uhrzeit und Datum übernommen. Vor dem Transport wurde der Datenlogger mit Hilfe von doppelseitigem Klebeband am linken unteren Rand des Zierrahmens befestigt (vgl. Abb. 4.6).

4.7 Beobachteter Transportvorgang

Gemessen wurde an einem Gemälde, das für eine themenbezogene Ausstellung der Neuen Pinakothek (Barerstraße, München) in die Kunsthalle der Hypo-Kulturstiftung (Theatinerstraße, München) über eine Strecke von 2,9 km transportiert wurde. Im Folgenden werden der beobachtete Transportvorgang und dessen prägnanten Ereignisse dargestellt. Das detaillierte Messprotokoll ist im Anhang zu finden (vgl. Anhang C). Dazu werden neben der verwendeten Transportkiste auch die Verpackungsmaterialien, die Transportmittel und das eingesetzte Fahrzeug beschrieben.

Räumlich und zeitlich startet die Messung im Bilderdepot der Neuen Pinakothek München um 09:01 Uhr am 24. Mai 2013. Anwesend sind fünf am Transport beteiligte Personen. Der textile Bildträger wurde zuvor bereits mit einem Zierrahmen, Rückseitenschutz und Schutzverglasung versehen. Er befindet sich auf einem Bilderwagen, aufrecht stehend, mit dem Glas (nicht bruchsicher) zum Gitter des Bilderwagens gewandt. Die zwei anwesenden Spediteure nehmen das Gemälde in Empfang und heben es vom Bilderwagen auf den Verpackungstisch, mit dem Bildgesicht diesem zugewandt. Überwacht wird der Vorgang von einem Kurier der Neuen Pinakothek und dem Depotverwalter. Das Bild wird gewendet und das Glas wird mit

einem speziellen Klebeband abgeklebt, um Splitter bei einem möglichen Bruch aufzufangen. Daraufhin wird eine PE-Folie zugeschnitten, auf dem Verpackungstisch ausgebreitet und das Kunstwerk, mittig auf der Folie positioniert, darin eingewickelt. Dann wird das Bild mit dem Bildgesicht nach unten in die bereitgestellte Klimakiste, welche bereits 24 Stunden vor dem Transportbeginn im Depot geöffnet wurde, gelegt und mit Spanngurten befestigt (vgl. Kap 3.7). Die hier verwendete Klimakiste ist nach dem vorgeschrieben Muster des Doerner Instituts konstruiert (vgl. Kap 3.7; Anhang B). Der nicht ausgefüllte Platz zwischen Bild und Kistendeckel wird mit einer individuell zugeschnittenen Schaumstoffplatte ausgekleidet. Der Deckel wird aufgesetzt und der Kistenkorpus mit den 16 vorgesehenen Schrauben verschlossen. Die fertig verpackte und verschraubte Kiste wird aufgestellt und auf zwei hartgummibereiften Transporthunden positioniert. Das Bild befindet sich im Inneren der Kiste in einer senkrechten Position.

Im Anschluss wird die Transportkiste über einen üblichen PVC-Boden, bzw. für eine kurze Strecke auch über Beton, zum bereitstehenden LKW gerollt. Das Bild wird auf die heruntergefahrene, aus Metall bestehende, Laderampe gestellt und nach oben gefahren. Innerhalb des LKW wird die Klimakiste an der linken Wand mit Gurten verzurrt. Die Position der Kiste wird je nach Verfügbarkeit gewählt, da sich in den meisten Fällen mehrere Exponate in einem Transportfahrzeug befinden. Um 09:40 Uhr nehmen die zwei Spediteure und der Kurier in der Fahrerkabine Platz, der Motor wird gestartet und der LKW begibt sich auf direktem Weg zur Kunsthalle der Hypo-Kulturstiftung.

Um 09:49 Uhr kommt der Transporter in der Tiefgarage der Hypo-Kulturstiftung an, der Motor wird gestoppt und kurz darauf die Laderampe geöffnet. Daraufhin wird die Kiste auf zwei Transporthunde gestellt und über den Betonboden zum Aufzug gefahren. Nachdem die Klimakiste mit dem Aufzug in den zweiten Stock befördert wurde, wird sie unüblicher Weise sofort geöffnet (dank der relativ ähnlichen Innen/Außentemperaturen in diesem Fall unproblematisch). Die Kiste wird auf den Boden gelegt, die Schrauben werden aufgeschraubt und das Bild, mit dem Bildgesicht nach unten, auf einen mit Stoff bezogenen rollbaren, hartgummibereiften Verpackungstisch gelegt. Die PE-Folie wird entfernt, das Bild wird gedreht und das zum Schutz des Glases angebrachte Klebeband wird langsam abgezogen. Daraufhin wird der Verpackungstisch an einen anderen Platz im Raum gerollt und das Bild von dem Kurier auf sichtbare Schäden untersucht. Da es im Moment noch nicht an den vorgesehenen Platz an der Wand gehängt werden kann, wird es vorerst mit dem Bildgesicht zur Wand auf einer Schaumstoffplatte auf dem Boden abgestellt und an die Wand angelehnt. Abschließend wird der an der Rückseite des Bildes angebrachte Datenlogger entfernt.

4.8 Auswertung

Die Auswertung und Interpretation der Messdaten erfolgt auf Basis quantitativer Analyseergebnisse sowie grafischer Darstellungen. Dazu werden neben einer Analyse der Maximalwerte auch eine RMS-Analyse und eine Grenzwertanalyse durchgeführt, wobei stets Microsoft Excel als Auswertungsprogramm verwendet wurde. Darüber hinaus werden für die aufgezeichneten Schockereignisse detaillierte grafische Darstellungen in Microsoft Powerpoint an-

gefertigt. Dabei werden die einzelnen Raumrichtungen für eine einfache Interpretation in unterschiedlichen Farben dargestellt (x (blau), y (grün), z (rot)).

Bevor die genannten Auswertungsmethoden angewendet werden können, müssen in einem ersten Schritt die aufgezeichneten Messdaten vom sogenannten ‚Trend‘ (z.B. der Erdbeschleunigung bzw. einer konstanten Neigung der Kiste) befreit werden, um eine Verfälschung der Messwerte auszuschließen. Dafür wurde für jede einzelne Messreihe der Mittelwert der Originalwerte je Raumrichtung berechnet, um im Anschluss die Differenz aus Originalwert und Mittelwert zu bilden. Die so bestimmten bereinigten Werte bilden die Grundlage für die folgenden Analysen.

4.8.1 Phaseneinteilung

Um die Ereignisse besser zuordnen zu können, wird der gesamte Transportvorgang in drei einzelne Phasen unterteilt.

1. Phase 1 (Innenraum)
2. Phase 2 (Außenbereich)
3. Phase 3 (Innenraum)

Die Phase 1 beschränkt sich auf die Räumlichkeiten der Neuen Pinakothek bis zum erfolgreichen Verladen der Klimakiste in den LKW. Die Phase 2 beginnt mit der Zündung des LKW-Motors am Leihvergabeort (Tiefgarage Neue Pinakothek) und endet mit dem Abstellen des Motors am Bestimmungsort (Tiefgarage der Hypo-Kulturstiftung). Die Phase 3 setzt ein, sobald der LKW den Motor abstellt und das Fahrzeug nicht mehr bewegt wird und findet ausschließlich in den Räumlichkeiten der Kunsthalle der Hypo-Kulturstiftung München statt.

4.8.2 Maximalwert

Besonders interessant sind die auftretenden Maximalwerte der einzelnen Schockereignisse. Um die maximalen Amplituden aus den Daten zu erhalten, ist es wichtig, den betragsmäßigen Maximalwert der Beschleunigungen zu ermitteln. Die betragsmäßige Betrachtung ist von Bedeutung, da eine Amplitude auch einen negativen Wert haben kann. Das Signum ist nicht relevant, da die Beschleunigung und nicht die Geschwindigkeit/Position gemessen wird. Die absoluten Maximalwerte werden benötigt, um die maximalen Einwirkungen während des Transports auf das Transportgut zu identifizieren.

4.8.3 RMS-Analyse

RMS- Amplituden ('Root-Mean-Square')

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} x_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\textit{Summe der quadrierten Amplituden}}{\textit{Anzahl der gemessenen Amplituden}}}$$

(Gl. 4.1)

Die RMS-Analyse, im Deutschen besser bekannt als das quadratische Mittel (vgl. Gl. 4.1), ist eine Methode zur Mittelwertbildung einer Messreihe. Bei der quadratischen Mittelung haben große Zahlenwerte einen stärkeren Einfluss als kleine. Die RMS-Amplituden machen einen Vergleich der auftretenden Erschütterungen während den einzelnen Phasen über einen bestimmten Zeitraum möglich. Die Werte werden über die Zeit in ein Diagramm aufgetragen und zu einer Kurve verbunden. So ist es möglich, einzelne Phasen miteinander zu vergleichen.

4.8.4 Grenzwertanalyse

Bei der Grenzwertanalyse werden alle Messwerte einer Phase einzelnen Äquivalenzklassen zugeordnet, die durch Repräsentanten (Minimum und Maximum je Klasse) bestimmt werden. Ziel ist es, anhand im Voraus definierter Grenzwerte festzustellen, wie groß der Anteil bestimmter Ausprägungen in einer Messreihe ist. Die Äquivalenzklassen dienen in diesem Zusammenhang dazu, die Gesamtmenge in einzelne Abschnitte aufzuteilen.

In der vorliegenden Arbeit wurden drei verschiedene Äquivalenzklassen gebildet. Um nicht verwertbare Messwerte von Vornherein auszuschließen, wird der erste Grenzwert bei 0,15 *g* gezogen. In diesem Bereich sind die gemessenen Werte vom ‚Rauschen' des Datenloggers überlagert. Um extreme Schockeinwirkungen zu identifizieren, wird ein weiterer Grenzwert bei 1 *g* definiert, so dass alle Messergebnisse über diesem Wert ebenfalls eingegrenzt werden können. Folglich ergibt sich als dritte Äquivalenzklasse der Bereich größer 0,15 *g* und kleiner als 1 *g*. Ausgegeben wird stets die absolute Anzahl der Messwerte sowie der prozentuale Anteil an der Gesamtmenge.

4.9 Interpretation

Die Interpretation der Messergebnisse erfolgt anhand der im vorangehenden Kapitel beschriebenen Auswertungsmethoden und bezieht sich ausschließlich auf die *g*-Werte, die während des Transports aufgezeichnet wurden. Dabei beziehen sich die einzelnen Beobachtungen jeweils auf die beschriebenen Phasen des Transportvorgangs (vgl. Kap. 4.8.1), wobei jede der einzelnen Phasen zur weiteren Systematisierung zusätzlich in unterschiedliche Schockereignisse unterteilt wurde. Für die Zuordnung der einzelnen Schockereignisse wurde das detaillierte Messprotokoll verwendet (vgl. Anhang C). Im Anschluss an die Analyse von Maximal- und Grenzwerten erfolgt eine Interpretation der aufgezeichneten Schockereignisse anhand

grafischer Darstellungen. Abschließend folgt eine Gesamtbetrachtung mit Hilfe der RMS-Analyse.

4.9.1 Maximalwerte und Grenzwerte

Die Maximalausschläge während der Phase 1 (vgl. Tab 4.1) traten im Rahmen des Verpackungsvorgangs auf. Dabei konnte in x-Raumrichtung ein Maximum von 3,13 *g*, in y-Raumrichtung eine Maximalamplitude von 2,41 *g* und in der z-Raumrichtung von 1,57 *g* gemessen werden. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass die z-Raumrichtung jeweils die stärkste Belastung erfährt, da diese in Richtung der Erdbeschleunigung wirkt und somit am häufigsten während des Transports angeregt werden sollte. Entgegen dieser Erwartung lag die absolute maximale *g*-Belastung des Bildes im Rahmen der vorliegenden Messung jedoch bei 3,13 *g* in Richtung der x-Raumrichtung. Im Allgemeinen kann gesagt werden, das der Wert den maximal erwarteten auftretenden Messwert von 8*g,*welcher auf das Ergebnis früherer Messungen zurückzuführen ist, nicht überschritten hat (vgl. Kapitel 4.5).

Tab. 4.1: Maximalwerte der Phase 1

Inhaus 1	**Absolute Maxima in [*g*]**		
	x	**y**	**z**
Schock 1	0,71	0,43	0,99
Schock 2	0,34	0,49	1,00
Schock 3	0,52	0,52	1,31
Schock 4	0,31	0,30	0,97
Schock 5	0,16	0,12	0,80
Schock 6	2,31	0,23	0,66
Schock 7	3,13	2,41	1,57
Schock 8	0,70	0,33	1,55
Schock 9	1,07	0,50	1,55
Schock 10	0,30	0,35	0,88
Schock 11	0,29	0,51	0,95

Während der Dauer von 38 Minuten der Phase 1 wurden 11 Schockevents aufgezeichnet, also mindestens 11 Mal der Schwellenwert von 2,0 *g* überschritten. Die häufigsten Überschreitungen des Schwellenwerts fanden, wie zu erwarten, in der z-Raumrichtung statt. Damit wird die Hypothese bestätigt, dass die z-Komponente in Hinsicht auf die Häufigkeit der Überschreitung des Schwellenwertes, das größte Gefahrenpotential der drei Raumrichtungen birgt. Viermal wurde der Schwellenwert auf der x- bzw. y-Komponente überschritten (Schock 6/7/9). Bis auf Schock 6 und 9 (x-Beschleunigung) und 7 (x/y-Beschleunigung) ist zu erkennen, dass die x- bzw. y-Raumrichtungen jeweils Amplituden unter 1 *g* aufweisen, während Messwerte in der z-Raumrichtung grundsätzlich Werte i.H.v. 1 *g* aufzeigen.

Die Analyse der Grenzwerte ergab für die x-Raumrichtung, dass 81,86 % der Messwerte unter 0,15 *g* liegen. 17,95 %, also 284 der insgesamt 1582 aufgezeichneten Messwerte, lagen zwischen 0,15 *g* und 1 *g*. Nur drei Mal wurde der Wert von 1 *g* überschritten. In der y-Raumrichtung sind 83,94 % der Werte kleiner als 0,15 *g*. Interessanter sieht die z-Raumrichtung aus. Hier wurden 48,23 % der Messwerte über 0,15 *g* gemessen. 1,58 %, also

25 Messwerte, waren sogar höher als 1 *g*. Innerhalb eines ‚Events‘ (also einer bestimmten Bewegung, die die Kiste macht und dadurch der Schwellenwert ausgelöst wird) werden mindestens 132 Samples abgebildet. Bei mehrfacher Überschreitung des Schwellenwertes können ‚Eventlängen‘ von 132+ x Samples entstehen. Daraus lassen sich auch die unterschiedlichen Längen erklären.

Die Phase 2, welche den Transportvorgang außerhalb des Hauses im LKW beschreibt, ist zeitlich mit einer Gesamtdauer von circa 11 Minuten bemessen. Auf den rund 2,9 Kilometern Entfernung wurde insgesamt nur zwei Events aufgezeichnet. Beide Male wurde der Schwellenwert in Richtung der z-Raumrichtung überschritten, wobei eine Maximalamplitude von 1,03 *g* (z-Komponente) gemessen wurde (vgl. Tab 4.2). Die Maximalausschläge lagen in x-Raumrichtung bei 0,48 *g* und in y-Raumrichtung bei 0,88 *g*.

Tab. 4.2: Maximalwerte der Phase 2

Außer Haus	**Absolute Maxima in [*g*]**		
	x	**y**	**z**
Schock 1	0,44	0,88	1,03
Schock 2	0,48	0,63	0,78

Die Analyse der Grenzwerte ergab für die x-Raumrichtung, dass 34,95 % der Messwerte unter 0,15 *g* liegen. 65,05 %, also 188 der insgesamt 289 aufgezeichneten Messwerte, lagen zwischen 0,15 *g* und 1 *g*. Kein Messwert überschritt den Wert 1 *g*. Gleiches kann für die y-Raumrichtung gesagt werden. In der z-Raumrichtung wurden 70,93 % der Messwerte größer als 0,15 *g* gemessen. 2,08 %, also insgesamt 6 Messwerte, überschritten sogar die 1 *g*.

Die Phase 3 ist hinsichtlich des abgedeckten Zeitraums mit der Phase 1 zu vergleichen. Sie erstreckt sich über circa 38 Minuten und beinhaltet die Ankunft des Bildes in der Kunsthalle der Hypo-Kulturstiftung sowie den Auspackvorgang. Insgesamt konnten 14 Schockevents aufgezeichnet werden. Das Aufhängen des Bildes konnte nicht mehr mit berücksichtigt werden, da der Datenlogger zuvor entfernt wurde. Ein maximaler Amplitudenausschlag von 2,62 *g* konnte in z-Raumrichtung aufgezeichnet werden. In der y-Raumrichtung trat ein Maximum von 2,04 *g* auf. Die x-Komponente wies einen Maximalwert von 1,22 *g* auf (vgl. Tab. 4.3). Generell kann im Rahmen der Phase 3 festgehalten werden, dass die meisten Schwellenwertüberschreitungen in dieser Phase ebenfalls in z-Raumrichtung stattfanden.

Tab. 4.3: Maximalwerte der 3 Phase

Inhaus 2	Absolute Maxima in [*g*]		
	x	y	z
Schock 1	0,52	0,63	1,22
Schock 2	0,27	0,18	0,90
Schock 3	0,26	0,34	1,22
Schock 4	0,44	0,23	0,82
Schock 5	0,55	0,29	1,41
Schock 6	0,21	0,22	0,99
Schock 7	0,41	0,35	1,22
Schock 8	0,41	0,43	1,33
Schock 9	0,44	0,68	1,40
Schock 10	0,32	0,37	1,41
Schock 11	0,70	0,62	2,62
Schock 12	0,70	0,62	2,62
Schock 13	0,70	0,62	2,62
Schock 14	0,70	0,62	2,62

Die Analyse der Grenzwerte ergab für die x-Raumrichtung, dass 71,90 % der Messwerte unter 0,15 *g* liegen. 28,07 %, also 939 der insgesamt 3342 aufgezeichneten Messwerte, lagen zwischen 0,15 *g* und 1 *g*. Bei der y-Raumrichtung wurden 71,36 % der Werte kleiner als 0,15 *g* gemessen. In z-Raumrichtung konnten 69,63 % der Messwerte über 0,15 g aufgezeichnet werden. 9,55 % (319 Messwerte) überschritten die Grenze von 1 *g*. Die Länge der Events war in diesem Fall sehr variabel. 9 Schocks, also 64 %, langen zwischen 132–139 Messwerten, 14 % zwischen 140–160 und die restlichen 22 % wiesen einen Wert von 161–818 auf. Insgesamt wurden in den Räumlichkeiten der Hypo-Kulturstiftung die meisten Messwerte sowie die häufigsten Schwellenwertüberschreitungen verzeichnet.

4.9.2 Interpretation der Diagramme

Jedes der folgenden Diagramme stellt ein Schockevent dar. An der Abszisse ist jeweils die Dauer des Samples in Millisekunden [ms] zu sehen. Der erste Messwert erhält den Startzeitpunkt 0,00 [ms], der zweite den Wert 0,63 [ms] ((Zahlenwert-1)/Abtastrate)) usw. An der Ordinate ist die Höhe jedes Samples in g-Werten abzulesen. Die Messwerte werden in Punktform auf der Ordinate über die Dauer (Abszisse) aufgetragen und miteinander verbunden, wodurch ein Linienverlauf entsteht. Das Liniendiagramm veranschaulicht die Werte der drei gemessenen Raumrichtungen, wobei die blaue Kurve den Verlauf der x-Richtung, die grüne den der y-Richtung und die rote den der z-Raumrichtung darstellt. Rechts oben im Diagramm ist der Auslösezeitpunkt zu sehen. Im Folgenden werden die einzelnen Diagramme auf ihren Kurvenverlauf hin analysiert. Dabei werden insbesondere diejenigen Schockereignisse verglichen, die aufgrund ihres Kurvenverlaufs bzw. identischer, mit Hilfe des Messprotokolls identifizierter, Ursachen als relevant eingestuft wurden. Alle weiteren Diagramme sind im Anhang zu finden (vgl. Anhang D).

Laut des Messprotokolls kann die Phase 1 in die folgenden belastenden Kategorien aufgeteilt werden: Drehen des Bildes, Rollen der gepackten Kiste auf einem Transportgerät, Abkleben des Schutzglases und Abstellen des Bildes. Erstaunlicherweise hatte das Verschrauben der Kiste wider Erwarten den eingestellten Schwellenwert von 2 *g* nicht überschritten, so dass dieser Vorgang nicht weiter beschrieben ist.

Die ersten, näher zu analysierenden Ereignisse, sind Schock 2 (vgl. Abb. 4.7) und 4 (vgl. Abb. 4.8), welche aufgrund ihres vergleichbaren Kurvenverlaufs und mit Hilfe des Messprotokolls mit hinreichender Sicherheit dem Vorgang ‚Abkleben des Glases' zuzuordnen sind. Außerdem ist die Länge von 132 bzw. 140 Messwerten relativ gleich lang und die Maximalwerte der einzelnen Komponenten weisen vergleichbare Amplituden auf.

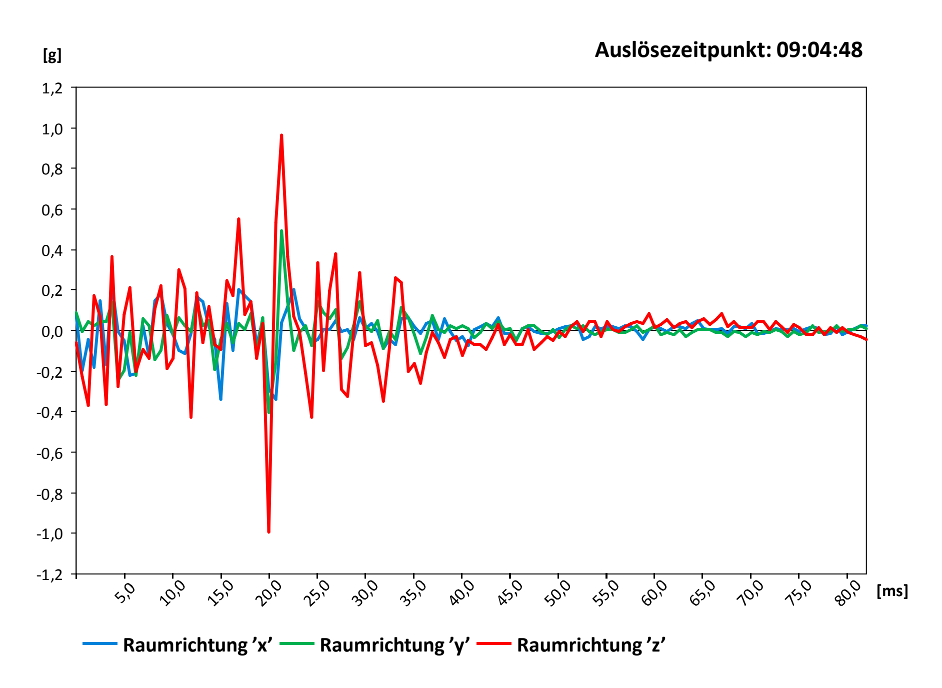


Abb. 4.7: Schockevent 2 der Phase 1

DETAILDARSTELLUNG | PHASE 1 – SCHOCK 4

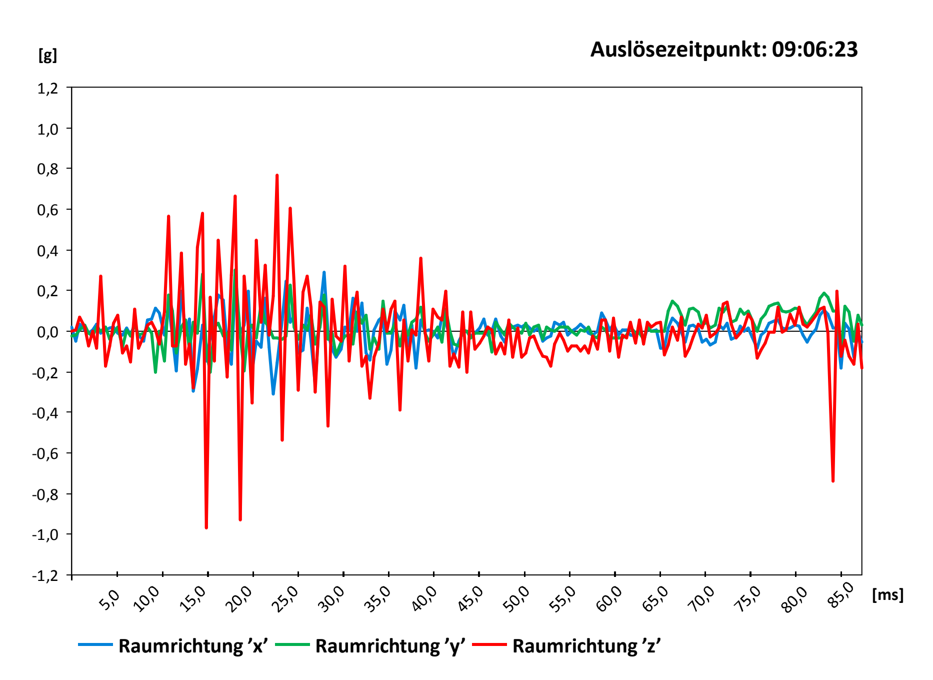


Abb. 4.8: Schockevent 4 der Phase 1

Als Zweiter, sehr auffällig ähnlich aussehender Diagrammverlauf werden die Diagramme der Schocks 5, 10 und 11 aufgeführt. Bei allen drei wird das Bild höchstwahrscheinlich in seiner Position verändert (gedreht, geht aus dem Messprotokoll und dem Zeitvergleich hervor).

DETAILDARSTELLUNG | PHASE 1 – SCHOCK 5

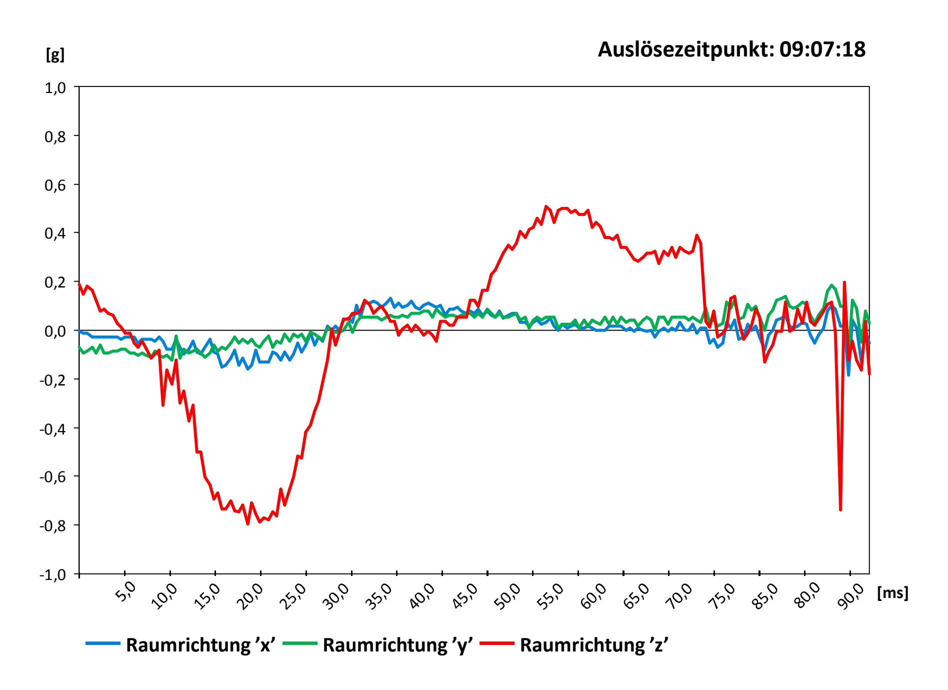


Abb. 4.9: Schockevent 5 der Phase 1

Schock 5 (vgl. Abb 4.9) zeigt vermutlich ein Drehen des Bildes ohne Verpackung. Da zuerst eine negative Beschleunigung der z-Komponente, darauf ein kurzer, kleiner Bauch und dann ein Ausschlag in die positive z-Richtung erfolgt, wird vermutet und durch das Messprotokoll bestätigt, dass das Bild mit dem Gesicht nach oben (der Datenlogger am Zierrahmen links unten angebracht) so gedreht wird, dass mit der Beendigung der Bewegung der Rückseitenschutz oben liegt. Man könnte dies auch als eine 180°-Drehung bezeichnen. Durch das leichte Anheben ist erst ein positiver Wert der Beschleunigung von ca. 0,2 *g* zu sehen, welcher ins Negative auf einer bauchförmigen Kurve mit dem Maximum von 0,8 *g* abfällt, um dann wieder in den positiven Bereich bis zum Scheitel bei ca. 0,5 *g* zu steigen. Der vergleichsweise parallel zur x-Achse verlaufende Bereich der z-Raumrichtung kann als Wendepunkt des Bildes gewertet werden. Die x- und y-Raumrichtung bleiben relativ unberührt, da das Bild höchstwahrscheinlich sehr gleichmäßig gedreht wurde.

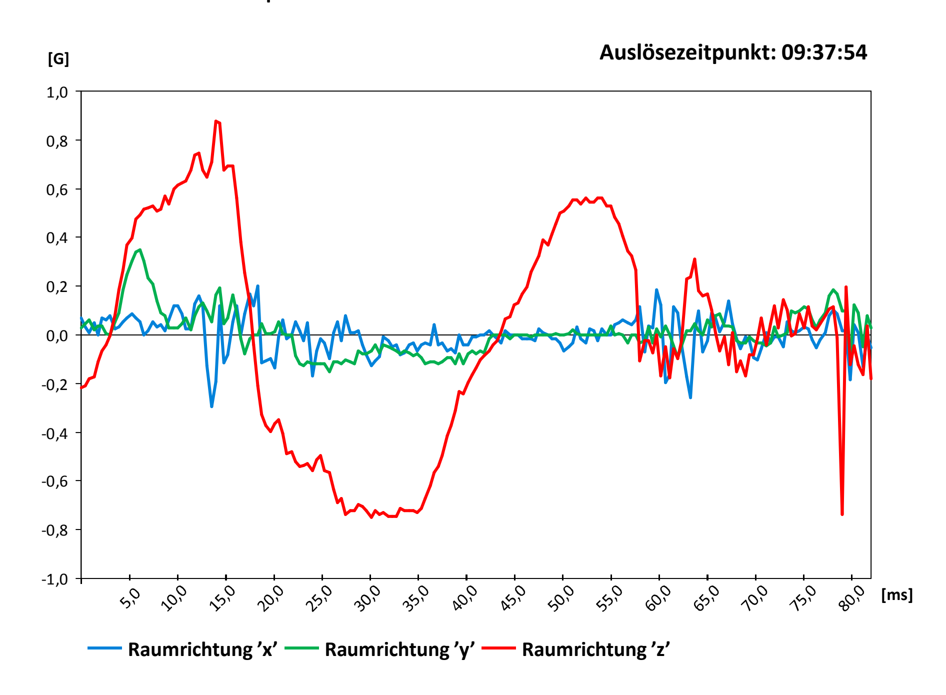


Abb. 4.10: Schockevent 10 der Phase 1

DETAILDARSTELLUNG | PHASE 1 – SCHOCK 11

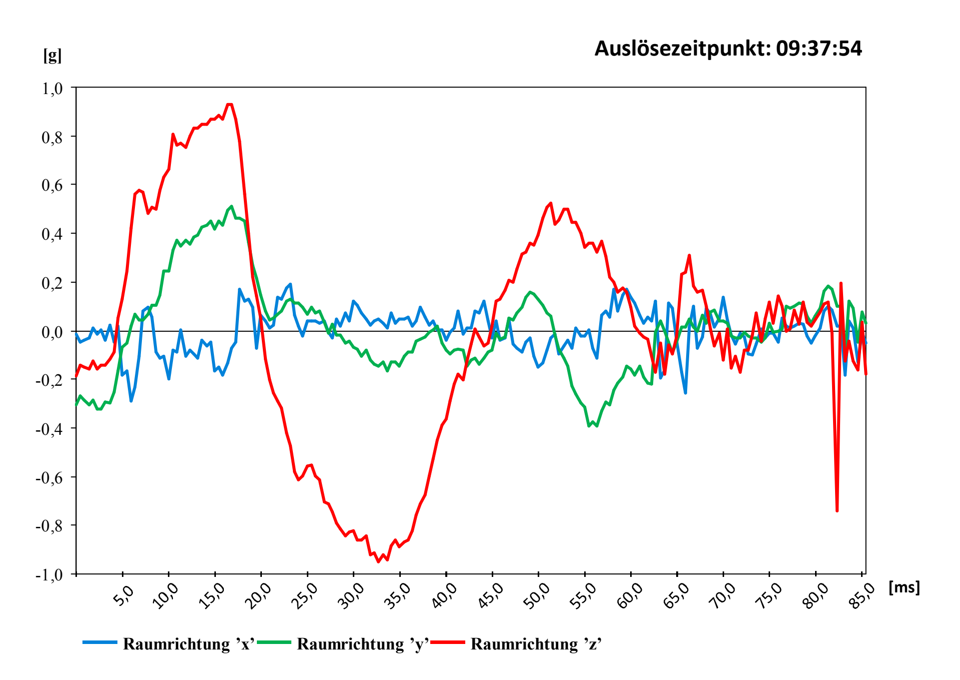


Abb. 4.11: Schockevent 11 der Phase 1

Schock 10 (vgl. Abb. 4.10) und 11 (vgl. Abb. 4.11) zeigen vermutlich ebenfalls ein Wenden des Bildes auf. Die Kurve der z-Richtung beginnt im negativen Bereich. Es findet zwar wie bei Schock 5 ein Anheben statt, es wird aber zuerst in die positive Richtung beschleunigt. Der Wendevorgang beginnt, allerdings befindet sich das Bild laut Messprotokoll schon in der Kiste, welche auf den Transporthunden positioniert werden soll. Da die Transportkiste nicht so handlich wie ein unverpacktes Bild ist, wird diese schief gehalten und so auch die x- und y-Richtung angeregt. Die Kiste wird halb gedreht (Schock 10) und dabei in z-Richtung ein Schock ausgelöst. In dem Moment nach der 90°-Drehung stimmen die Achsen des absoluten Koordinatensystems (auf welches sich die Interpretation bezieht) und die des Sensorkoordinatnsystems nicht mehr überein. Die zwei fast identischen Diagramme werden im Sensorkoordinatensytem auf zwei verschiedenen Achsen aufgezeichnet, während sie im absoluten Koordinatensystem einer, der z-Richtung, entsprechen. Der maximale Ausschlag am Ende des Verlaufs tritt in allen drei Diagrammen auf, kann aber nicht genau zugeordnet werden. Anders als erwartet ergab das Schieben des Transporthunds keine Ausschläge. Das bedeutet, dass der Kistenaufbau einen sehr guten Schutz für das Bild bietet, so dass keine messbaren Werte über 2 *g* auftreten.

In der Phase 2 waren folgende belastende Vorgänge zu erwarten: Beschleunigen/Abbremsen des LKW, Abbiegevorgänge, Bodenschwellen, Schlaglöcher und andere Straßenbeschädigungen. Entgegen der Erwartung, dass der Transport mit dem LKW einen großen Einfluss auf das Kunstwerk hätte, spielte in dieser Phase nur das Beschleunigen auf Bodenunebenheiten eine Rolle (Neigung des Bodens des Laderaums).

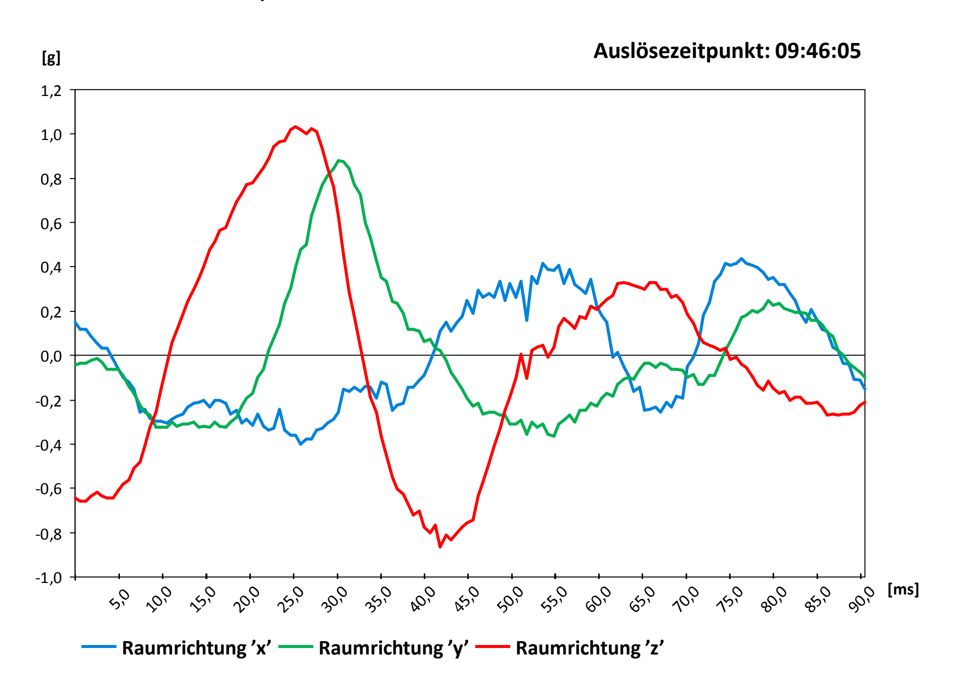


Abb. 4.12: Schockevent 1 der Phase 2

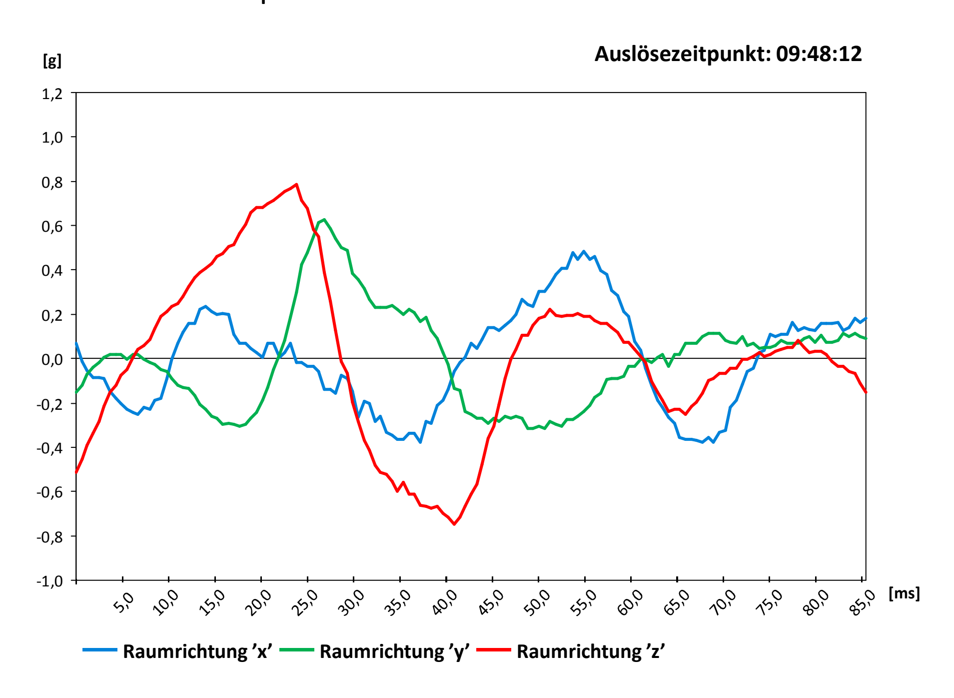


Abb. 4.13: Schockevent 2 der Phase 2

Aus den beiden Diagrammen (vgl. Abb. 4.12 und 4.13) lässt sich erkennen, dass nicht nur die z-Richtung zu Überschreitungen der Schwellenwerte geführt hat, sondern auch die x- und die y-Richtung angeregt wurden. Wahrscheinlich ist die Achsen des LKW kurzfristig mit einer Neigung belastet worden. Die Amplitude beginnt im Negativen und schwingt dann in einem bauchigen Bogen ins Positive. Ein Nachschwingen lässt sich dabei sehr gut am Kurvenverlauf

der z-Raumrichtung erkennen. Der Verlauf der Kurven ist sehr bauchig, man kann auf eine langsame Steigerung der *g*-Werte zurück schließen.

In Phase 3 ist das Bild an seinem Bestimmungsort angekommen und wird verladen. Folgende Ereignisse können eine Belastung für das Bild darstellen: Das Entladen des LKW, das Schieben auf dem Transporthund, das Auspacken aus der Transportkiste, das Ablegen auf den Untersuchungstisch, das Verschieben des Untersuchungstisch und das Drehen des Bilds. Wie in Phase 1 hat das Aufschrauben der Kiste keinen Schockevent ausgelöst.

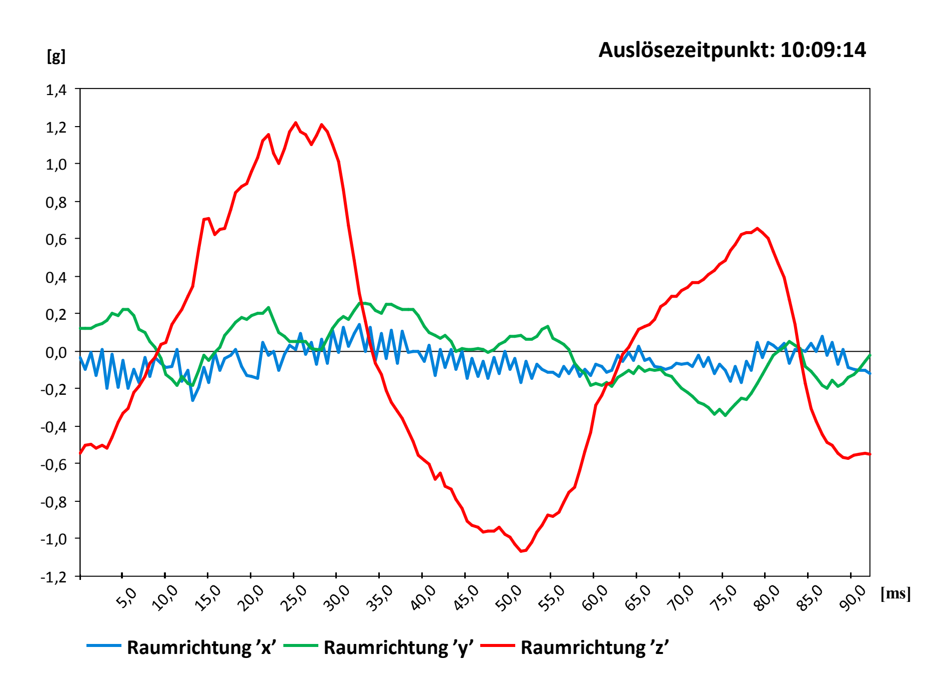


Abb. 4.14: Schockevent 3 der Phase 3

DETAILDARSTELLUNG | PHASE 3 – SCHOCK 4

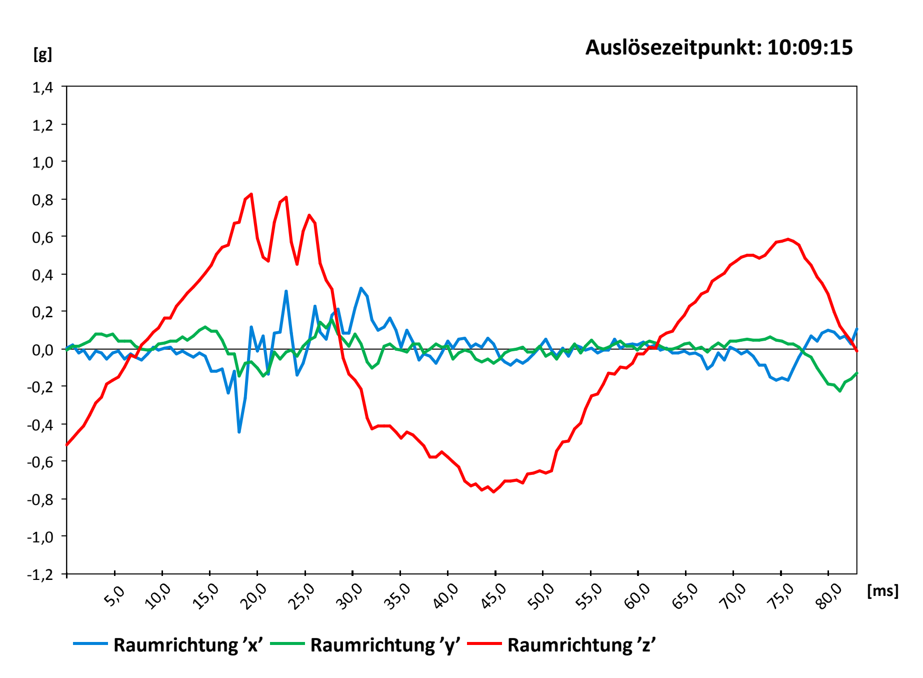


Abb. 4.15: Schockevent 4 der Phase 3

Bei Schock 3 (vgl. Abb. 4.14) und 4 (vgl. Abb. 4.15) handelt es sich, verglichen mit dem Messprotokoll, wahrscheinlich um das Ruckeln des Aufzugs beim Losfahren, mit zwei fast identischen Diagrammen der Werte. Der Maximalamplitudenausschlag überschreitet knapp die 1 g.

DETAILDARSTELLUNG | PHASE 3 – SCHOCK 11

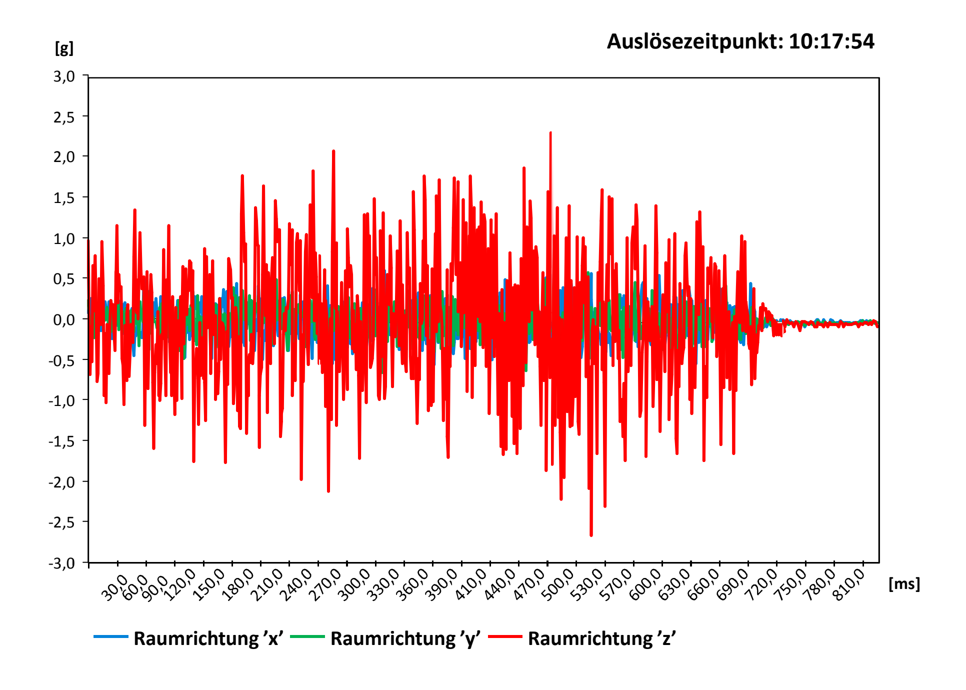


Abb. 4.16: Schockevent 11 der Phase 3

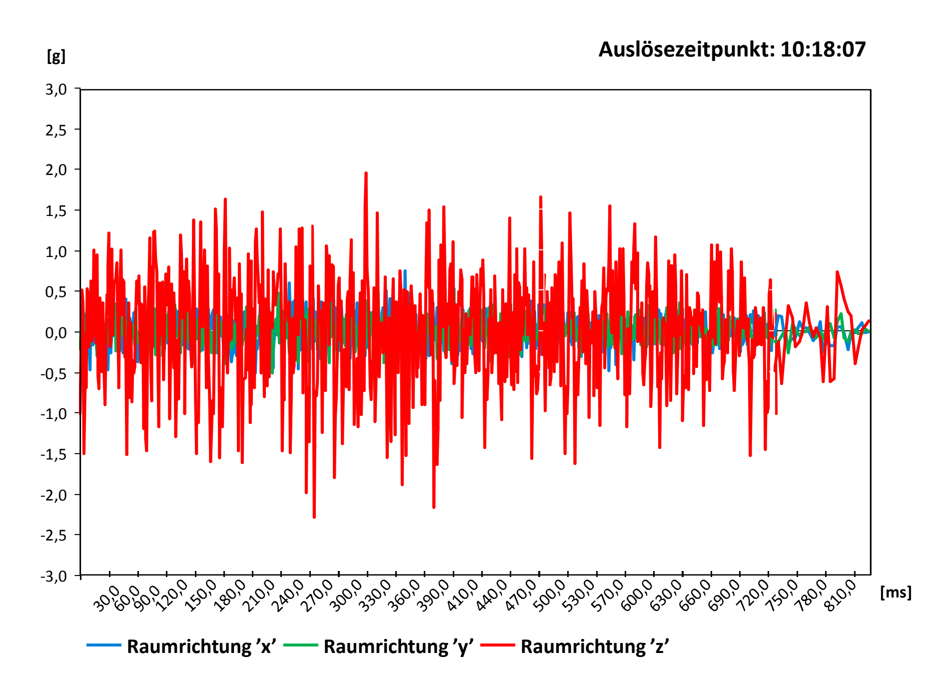


Abb. 4.17: Schockevent 12 der Phase 3

Herausgestochen sind Schock 11 (vgl. Abb. 4.16) und 12 (vgl. Abb. 4.17) mit jeweils über 700 Messwerten. Der Schwellenwert wurde mehrmals hintereinander überschritten und erreicht Maximalamplituden in der z-Raumrichtung von bis zu 2,62 *g*. Laut des Messprotokolls lag das Bild bereits ausgepackt auf dem Bildertisch. Der im Verhältnis zu den anderen Messwerten extrem lang anhaltende Ausschlag ist höchstwahrscheinlich auf das Befestigen der Aufhängedrähte (links und rechts) zurückzuführen. Diese wurden in extra dafür angebrachte Ösenplatten gesteckt und verschraubt. Das die x- und y-Raumrichtungen auch angeregt wurden, ist darauf zurückzuführen, dass das Bild leicht angehoben und auf dem Bildertisch verschoben wurde.

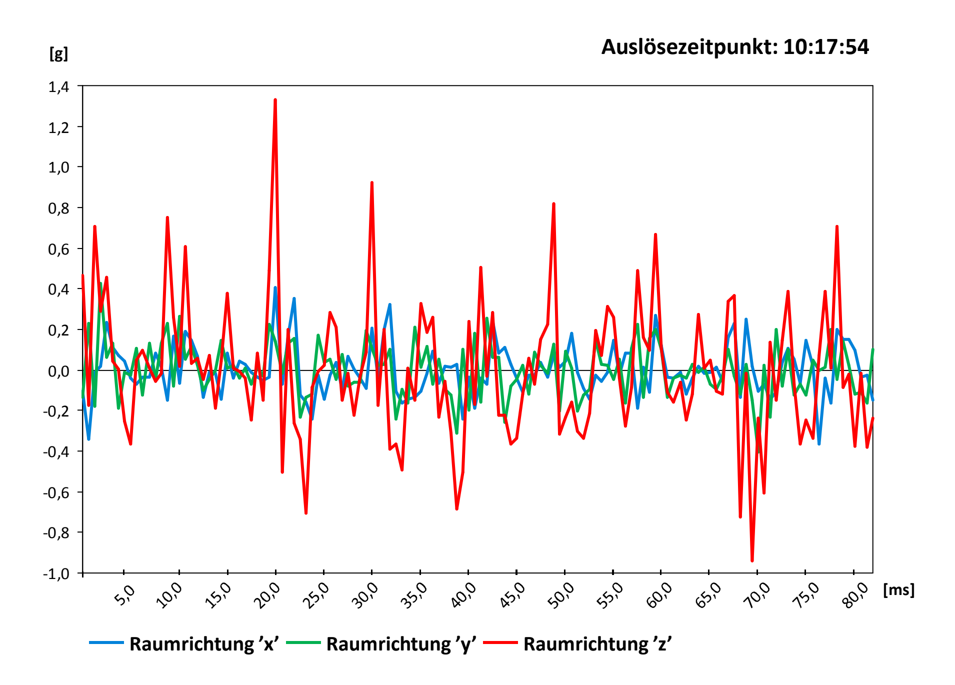


Abb. 4.18: Schockevent 8 der Phase 3

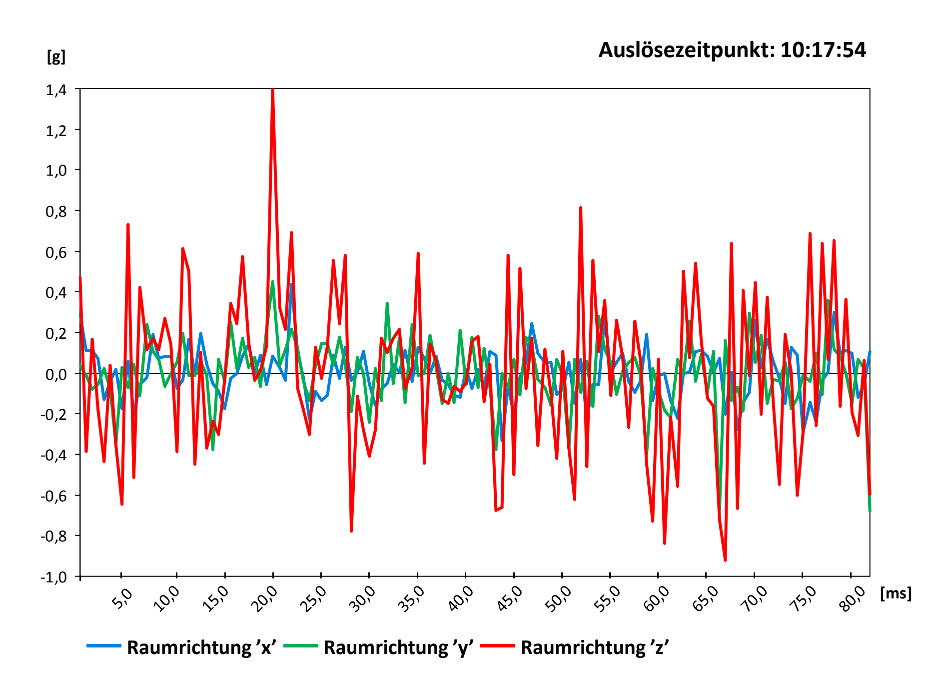


Abb. 4.19: Schockevent 9 der Phase 3

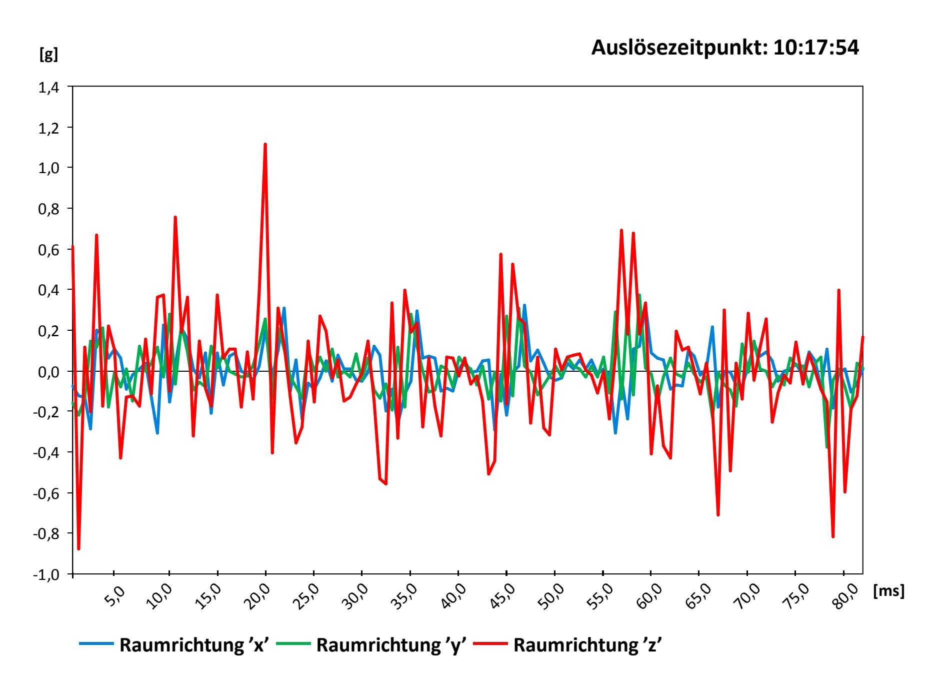


Abb. 4.20: Schockevent 10 der Phase 3

Schock 8 (vgl. Abb. 4.18), 9 (vgl. Abb. 4.19) und 10 (vgl. Abb. 4.20) sind laut Messprotokoll ebenfalls entstanden, als das Bild unverpackt auf dem Bildertisch lag. Sie werden höchstwahrscheinlich durch ein Klopfen auf der Oberseite des Zierrahmens verursacht. Die Amplitude liegt bei ca. 1,4 *g*. Der Verlauf ist relativ hart (zickzack).

Ab Schock 14 um 10.44 Uhr ist der Transportvorgang beendet und das Bild wird an die Wand gehängt. Die Maximalamplitude lässt sich wahrscheinlich auf das Abziehen des Datenloggers zurückzuführen und wirkt nicht mehr auf das Bild.

4.9.3 Gesamthafte Betrachtung

Alle drei Phasen vergleichend betrachtet kann gesagt werden, dass in Phase 1 alle 3 Min und 27 Sekunden ein Schock aufgetreten ist. In Phase 2 trat alle 5 Minuten 30 Sekunden eine Event auf. In der dritten Phase wurde im Schnitt alle 2 Minuten 46 Sekunden ein Schock aufgezeichnet. So kann gesagt werden, dass die Phase 3, die Phase mit den meisten Events auf die Dauer bezogen ist und somit die höchste Belastung für das Bild darstellt.

Die absolute Maximalamplitude aller drei Phasen liegt für die x-Raumrichtung bei 3,14 *g* (Phase 1), in der y-Raumrichtung bei 2,41 *g* (Phase 1) und in der z-Raumrichtung bei 2,62 *g* (Phase 3). Im Kontrast zu Vergleichsmessungen lagen demnach die maximalen Ausschläge deutlich niedriger als die dort gemessenen 3-8 *g* [vgl. Saunders 1998]. Um das auf die Entwicklung der Technik bzw. bessere Verpackungsmaterialien zurückführen zu können und nachhaltig zu beweisen, dass geringere Belastungen auftreten, müssten weitere Messungen durchgeführt werden. Ob lange oder kurze Strecken mit dem LKW belastender sind, muss ebenso nachgeprüft werden, da zwar bei Langstrecken besser ausgebaute Straßen, wie zum

Beispiel Autobahnen befahren, aber auch höhere Geschwindigkeiten erreicht werden, was die Heftigkeit eines Schlaglochs in dessen Wirkung wahrscheinlich heraufsetzten wird. Um die Schwingungsmuster zu überprüfen und ein zufälliges Auftreten dieser auszuschließen, müssen zusätzliche Vergleichsversuche durchgeführt werden. Die Versuche können sich auf den Indoorbereich beschränken, da dort am häufigsten der Schwellenwert überschritten wurde. Vor allem beim Wenden des Bildes und bei der Fahrt auf dem Transporthund/Bilderwagen, also während der Handlingphasen, traten hohe Messwerte auf. Dies bestätigt auch andere durchgeführte Messungen, wie zum Beispiel von Saunders [1998].

Um generell zu überprüfen, wie hoch die Belastung des verpackten Bildes hinsichtlich der Maximalwerte ist, wurde eine weitere Analyse durchgeführt. Aus allen im Rahmen der einzelnen Phasen gemessenen Maximalwerten wurde je Phase ein Mittelwert gebildet und diese miteinander verglichen. Allerdings ist keine Tendenz zu erkennen. Das sich außerhalb der Kiste befindende Bild ist einem durchschnittlichen Belastungswert von 1,26 *g*, das innerhalb der Kiste 1,28 *g* ausgesetzt. Im Schnitt liegt der Maximalwert der Belastung des ausgepackten Gemäldes 1 % niedriger als beim verpackten Bild. Die stärkste Belastung in allen drei Phasen erfährt – wie zu erwarten – die z-Raumrichtung.

4.10 RMS-Amplituden

Anhand der RMS-Amplituden lassen sich die durchschnittlichen Erschütterungen beurteilen. Sie eignet sich besonders gut zum Vergleich der auftretenden Transportphasen. So kann die Phase mit den höchsten Einwirkungen ermittelt werden. In dieser Arbeit werden die Indoorphasen (Phase 1 und 3) miteinander verglichen. Phase 2 wird nicht beachtet. Jeder Wert im Diagramm (vgl. Abb. 4.21) ist die berechnete RMS-Amplitude der z-Komponente über eine Phase.

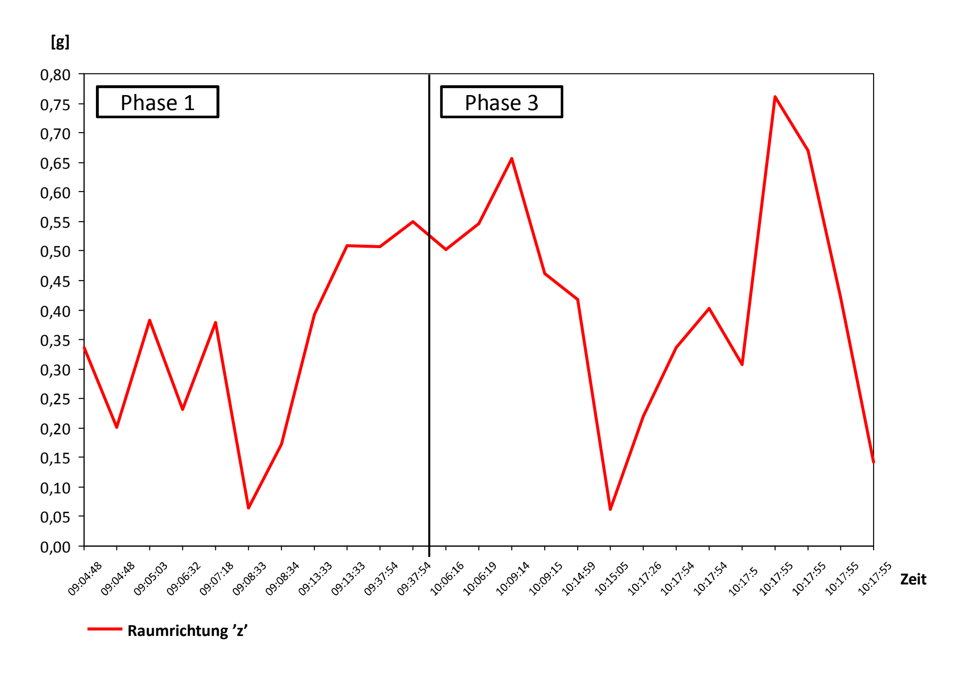


Abb. 4.21: RMS-Analyse der Phase 1 und 3 im Vergleich

Aus der Auswertung der Daten lässt sich erkennen, dass in Phase 3 die Schwingungen wesentlicher höher sind als in Phase 1. Das kann daran liegen, dass das Bild nach dem Auspacken einfach viel stärker und häufiger bewegt wurde als beim Einpacken. Auch kann der höhere Ausschlag darauf hinweisen, dass die einpackenden Personen noch mehr darauf geachtet haben, das Bild sehr vorsichtig zu bewegen.

Welches Gefahrenpotential die auftretenden Werte mit sich bringen, kann nicht beurteilt werden. Um herauszufinden, ab welchem *g*-Wert ein Schock eine Gefahr für den Zustand eines Gemäldes mit sich bringt, gäbe es zum Beispiel die Möglichkeit, die Meinung eines fachkundigen Restaurators hinzuzuziehen und in aufwendigen Einzelversuchen (die Individualität jedes Bildes ist zu beachten) sich dieser Problemstellung anzunehmen.

4.11 Fehlerbewertung

Bei Messungen kleiner als 0,15 *g* wird nur noch das Rauschen des Datenloggers aufgezeichnet. Dies konnte in einem Versuch bewiesen werden. Der Logger wurde auf einen Tisch gelegt und zeichnete ohne angeregt zu werden kontinuierlich eine Schwingung mit einer gleichbleibenden Amplitude von 0,15 *g* auf.

Im Datenblatt des Datenloggers ist eine Genauigkeitsabweichung von +/-0,15 *g* angegeben, das heißt alle aufgezeichneten Messdaten können um +/-0,15 *g* von ihrem angegebenen Wert abweichen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, mechanische Schwingungen, welche auf Kunstwerke wirken, mithilfe von Sensorik, wie sie im Allgemeinen im Rahmen der zerstörungsfreien Prüfung zur Anwendung kommt, gezielt auf auftretende Maximalwerte zu untersuchen.

Zu diesem Zweck wurden im theoretischen Teil dieser Arbeit verschiedene Fachbegriffe definiert und erläutert, sowie wesentliche Einflussgrößen, die potenziell zur Beschädigung von Kunstwerken führen können, detailliert. Darüber hinaus wurden im Kontext eines Kunsttransports relevante Faktoren, wie zum Beispiel der Ablauf des Transportvorgangs, die eingesetzten Transportmittel sowie der Aufbau der verwendeten Transportkiste, näher beschrieben. Das Kapitel schließt mit einer Vorstellung der zur Verfügung gestellten Messgeräte und der Auswahl des im Folgenden verwendeten Geräts ab.

Das Kapitel 4, der praktische Teil, beginnt mit der Beschreibung relevanter technischer Eckdaten des verwendeten Datenloggers MSR165. Des Weiteren wurden die Funktionsweise des Messgeräts überprüft und wesentliche Parameter anhand von verschiedenen Vorversuchen für die Durchführung der anschließenden Messung festgelegt. Im Zentrum dieses Kapitels steht die Überwachung, Aufzeichnung und Auswertung eines Kunsttransportes zwischen der Neuen Pinakothek und der Kunsthalle der Hypo-Kulturstiftung. Die im Rahmen des Transportvorgangs aufgezeichneten Schwingungsmessungen wurden in Form eines eigens entwickelten Messkonzepts quantitativ ausgewertet und anhand grafischer Darstellungen qualitativ interpretiert.

Nach Auswertung der Messergebnisse konnte festgestellt werden, dass der Datenlogger MSR165 sich grundsätzlich für die zerstörungsfreie Überwachung von Kunsttransporten eignet. So erlaubt das Gerät, Beschleunigungen in alle drei Raumrichtungen aufzuzeichnen und ermöglicht, sämtliche Messwerte, die einen Schwellenwert von 2 *g* überschreiten, mit einer Genauigkeit von +/- 0,15 *g* – soweit dies zu beurteilen ist – zuverlässig zu erfassen. Dabei zeichnete sich der verwendete Datenlogger insbesondere durch die Fähigkeit aus, alle Messergebnisse ohne sichtbare Beschädigungen des überwachten Kunstwerks zu erfassen.

Insbesondere während der so genannten Handlingphasen des Transports wurde im Rahmen der durchgeführten Messung die höchste Belastung für das Kunstwerk festgestellt. So konnte beispielsweise für die z-Raumrichtung ein maximaler Ausschlag in Höhe von 2,62 *g* aufgezeichnet werden. Die Aufzeichnungsgrenze des verwendeten Datenloggers von 15 *g* wurde in keinem Fall erreicht, wobei zu berücksichtigen ist, dass Extremsituationen wie ein Fallenlassen oder Werfen der Kiste nicht Teil der durchgeführten Messungen waren. Diese Ergebnisse bestätigen nur zum Teil vorliegende Erkenntnisse aus anderen, mit einem ähnlichen Versuchsaufbau durchgeführten Messungen, da die gemessenen Beschleunigungswerte geringer als in der Literatur ausfielen. Gleichzeitig konnte festgestellt werden, dass der Transport des Kunstwerks im Außenbereich zu geringeren Belastungen als erwartet geführt hat. So wurde der Schwellenwert insgesamt nur zweimal überschritten, wobei der maximale Ausschlag 1,03 *g* in z-Raumrichtung betrug. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass für Bodenunebenhei-

ten sichtbare Einwirkungen auf das Kunstwerk festgestellt werden konnten, wohingegen eine potenziell ungünstige Bereifung der eingesetzten Transportgeräte ohne sichtbaren Effekt war.

Einschränkend bleibt für den Datenlogger MSR165 festzuhalten, dass die Speicherkapazität des Geräts in Höhe von maximal 2.000.000 Messwerten für eine kontinuierliche bzw. langfristige Überwachung von Kunsttransporten nur bedingt geeignet ist. Eine Aufzeichnung eines Transportvorgangs im Programmmodus ‚Vibration' mit einer maximalen Abtastrate von 1.600 Hz ist so beispielsweise für nur maximal 15 Minuten möglich. Außerdem lassen sich Messwerte unter 0,15 *g* nicht aufzeichnen, da diese mit dem sogenannten Rauschen des Datenloggers zusammenfallen.

Nach Kenntnisnahme der Ergebnisse dieser Arbeit sollte der erste weiterführende Schritt sein, weitere Testmessungen zur Bestätigung der auftretenden Extremwerte durchzuführen. Hierzu wäre der vorgestellte Messablauf mehrfach hintereinander unter gleichen Bedingungen durchzuführen. Darüber hinaus wäre die Entwicklung eines standardisierten Messkonzepts, welches über mehrere Institutionen hinweg vergleichend zum Einsatz kommen könnte, hilfreich. So könnten Messwerte international vergleichbar gemacht und auf Basis einer größeren Grundgesamtheit interpretiert werden.

Zudem sollten die vorliegenden Resultate mit Hilfe von Restauratoren analysiert und hinsichtlich ihres individuellen Schadenspotenzials für verschiedene Kunstwerke untersucht werden. So wäre beispielsweise der Zusammenhang zwischen häufig auftretenden Schadensbildern – unter anderem Craquelé – und mechanischen Einwirkungen auf das Bild tiefergehend zu untersuchen. Hierzu wäre es sinnvoll, den Schichtaufbau der Farbe bezüglich seiner Materialgrenzen zu überprüfen. Gleichzeitig könnten auch Langstreckentransporte dem vorgestellten Untersuchungskonzept unterzogen und mit Blick auf mögliche Belastungen analysiert werden. Zu diesem Zweck könnte eine Versuchsreihe mit einem Fahrzeugsimulator gestartet werden, welcher auf spezifische Eigenschaften einzelner LKW-Modelle einzustellen wäre. Auch eine Auswertung zusätzlicher Messparameter, wie zum Beispiel Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Druck, wäre von großer Relevanz.

6 Literaturverzeichnis

Avisaro AG: *Funktionsweise von Datenlogger.* o.J., URL: http://www.avisaro.com/tl/datenloggerfunktion.html (Stand 11.07.2013)

Bäschlin, Nathalie (Projektleitung) **et al**: *Transport fragiler Gemälde: Risikoabschätzung für Schock- und Vibrationsimmissionen sowie Entwicklung neuer Präventionsstrategien.* Forschungsschwerpunkt Materialität in Kunst und Kultur, Hochschule der Künste Bern, Laufzeit 3/2010-5/2012

BASF, The Chemical Company: *Neopolen P.* 2012, URL: http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/content/products/foams/neopolen_p (Stand 11.07.2013)

Begov, Eve; Kuschel, Lutz: *Kunst auf Reisen : Schock- und Vibrationsmessungen bei Kunsttransporten*. 2007, Restauro, Nr. 4, S.258-266

Bergische Universität Wuppertal: *o.A.,* o.J., URL: http://www.dasp.uni-wuppertal.de/ars_auditus/akustik/akustik22.gif

Caldicott, Peter J.: *Vibration and shock in transit situations : A practical evaluation using random vibration techniques.* In: Art in Transit : Studies in the Transport of Paintings. International Conference on the Packing and Transportation of Paintings, 1991, London. Washington, National Gallery of Art, S. SE-1 – SE-24

Costain, Charles: *Scientific Rationale for Studies on Packing and Transportation of Paintings: An Introduction to the Issues.* In: Art in Transit; Sudies in the Transport of Paintings;Editor: Mecklenburg, Marion F.; Washington, DC; National Gallery of Art, 1991.-ISBN: 0-89468-163-X, Seite 19-24

Dahlin, Elin: *Propaint : Improved Protection of Paintings during Exhibition, Storage and Transit : Final Activity Report.* 2010, Kjeller. Norwegian Insitute for Air Research, Seiten 164

DIN 1319 (1995): *Grundbegriffe – Teil 1;* Ausgabe 2012/08

Eden, Klaus; Gebhard, Hermann: *Dokumentation in der Mess- und Prüftechnik: Messen-Auswertem-Darstellen : Protokolle-Berichte-Präsentationen.* 2011. 1. Auflage, Deutschland : Vieweg+Teubner Verlag (Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011), – ISBN 978-3-8348-1600-9, 197 Seiten

Fraunhofer Institut et al: *ArtGuardian : Fraunhofer – Technologie für die präventive Konservierung.* o.J. (Datenblatt)

Fuesers Olga; Krieg, Volker; Kühnen, Renate: *Studie zum hygroskopischen Verhalten von Holz : Dehnungsstreifen zur Dokumentation von Materialeigenschaften.* 2005, Deutschland, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung: ZKK 19; Heft 1, S.129-136

Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaf e.v.: *Beanspruchung im Straßenverkehr*, 2013, URL: http://www.tis-gdv.de/tis/misc/mechanisch.htm

Giancoli, Douglas C; Eibl, Oliver: *Physik : Lehr- und Übungsbuch.* 2010, 3. Erweiterte Auflage, München, Boston, Mass. [u.a.] : Pearson Studium, - ISBN 978-3-8689-4023-7, Seiten 1640

Green, Thimothy: *Shock and Vibration : Test results for framed paintings on canvas support*. In: ICOM – 8th Triennial Meeting, Sydney Australia, 6-11 Sept. 1997, Preprints Vo. II, 1987, London, James& James /Earthscan, Seite 585-596

Große, Christian: *Grundlagen der Zerstörungsfreien Prüfung*. WS 2011/12, München, Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung, Seiten 101

Kaiser, Wolfgang : *Kunststoffchemie für Ingenieure : von der Synthese bis zur Anwendung*. 2011, 3.Auflage. München : Carl Hanser Verlag München. – ISBN 978-3-446430-47-1, Seiten 608

Knippers, Jan; Cremers, Jan; Gabler, Markus; Lienhard, Julian: *Atlas Kunststoffe + Membranen : Werkstoffe und Halbzeuge : Formfindung und Konstruktion.* 2010, 1. Auflage, Regensburg : Institut für internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG – ISBN 978-3-920034-41-6, Seiten 296

Ledermann, Peter; Wieser, Sebastian: *Möbel und Serie Standard,* o.J., URL: http://www.mercateo.com/p/live~showGrossColumn*514-1938/Moebelhund_Abmessung_600_x_300_x_145_mm_Traglast_300_kg.html *(Stand 11.07.2013)*

Magnus, Kurt; Popp, Karl; Sextro Walter: *Schwingungen; Physikalische Grundlagen und mathematische Behandlung von Schwingungen.* 2013, 9. Auflage. Springer Verlag, - ISBN 978-3-8348-2574-2, 298 Seiten

Marcon, Paul J.: *Shock, Vibration and Protective Package Design.* In: Art in Transit : Studies in the Transport of Paintings. 1991b, Washington, National Gallery of Art, S.107-120, International Conference on thePacking and Transportation of Paintings, Sept. 9-11, London. S. 107-120

Marcon, Paul J.: *Shock, Vibration and the Shipping Environment. In: Art in Transit : Studies in the Transport of Paintings.* 1991a, Washington, National Gallery of Art, S. 121-132. International Conference on thePacking and Transportation of Paintings, Sept. 9-11, London.

Mecklenburg, Marion F.; Tumosa, Charles S.: *An Introduction into the mechanical Behavior of Paintings under rapid Loading Conditions*. In: Art in Transit-Studies in the Transport of Paintings. International Conference on the Packing and Transportation of Paintings. Sept. 9-11, 1991, London, Washington; National Gallery of Art, 1991, S. 137-171

Michalski, Stefan: *Paintings : Their Response to Temperature, Relative Humidity, Shock and Vibration.* In: Art in Transit : Studies in the Transport of Paintings. International Conference on the Packing and Transportation of Paintings, 1991, London. Washington, National Gallery of Art, S. 223-248

MSR Electronics GmbH: *Benutzerhandbuch MSR 145*. 2008 (Datenblatt)

MSR Electronics GmbH: *Benutzerhandbuch MSR 165*. 2008 (Datenblatt)

MSR Electronics GmbH: *MSR165 : Datenlogger für Schock und Vibration.* o.J. (Datenblatt)

NaNoform Airbag Sports GmbH: *ThermoPUR-Schaum. o.J. URL:* http://nanoform-schaumstoffe.de/afc3/shop_content.php?coID=854&XTCsid=47f298b003f4ff4707c8a4dff2b90c95 *(Stand 11.07.2013)*

O.A. *: Aufbau einer Transportkiste.* o.J., Doerner Institut

Palmbach, Cornelius: *Messung transportbedingter Schwingungen an textilen Bildträgern*. 2007, Diplomarbeit, Konservierung und Restaurierung, Hochschule der Künste Bern

Poggendorf, Renate: *Klima bei Kunsttransporten.* 2005, Seminararbeit, o.A., Hochschule für Bildende Künste Dresden

Poggendorf, Renate (Diplomrestauratorin, Leitende Restauratorin Neue Pinakothek und Sammlung Schack)**; Schwemer Florian (**Restaurator, Leitender Restaurator Sammlung Moderne Kunst in der Pinakothek der Moderne); Gespräch : Braun, Nathalie, 17.05.2013, Neue Pinakothek

Proakis, John G.; Manolakis, Dimitris G.: *Digital Signal Processing*. 1996, 3. Auflage. Prentice Hall, ISBN 0-13-394289-9, S. 751

Richard, Mervin; **Meckenburg, Marion F.; Merrill, Ross M**.: *Art in Transit: Handbook for Packing and Transporting Paintings*. 1997, 2.Auflage, National Gallery of Art Washington DC, –ISBN 0-89468-165-6, 91 Seiten

Saunders, David : *The Effect of Painting Orientation during Air Transportation.* In: ICOM – 14th Triennial Meeting The Hague, 12-16 Sept. 2005, Preprints Vol. II, London, James&James/Earthscan, 2005, S. 700-707

Saunders, David: *Monitoring Shock and Vibration during the Transportation of Paintings.* 1998, London; National Gallery Technical Bulletin, Nr. 19, S.64-73

Saunders, David; Reeve, Anthony: *Protective Glass for Paintings.* In: Technical Bulletin, 1994 vol. 15, National Gallery

Schwemer, Florian *: Hinweise zur Verpackung und zum Transport von Kunstwerken der Bayerischen Staatsgemäldesammlung,* o.J. siehe Anhang

Simon, Stefan (Professor Doktor, Direktor Rathgen-Forschungslabor Staatliche Museen zu Berlin): Gespräch : Braun, Nathalie, 3.5.2013, Lenzstraße Olching

Stühler, Waldemar: *Einwirkungen von Erschütterungen auf Kunstgegenstände beim Transport mit Kurier-Koffern*. 1987, Deutschland, Kunsttechnologie und Konservierung 1 Heft 1, S. 68 - 74.

Stühler, Waldemar: *Möglichkeiten zur Reduzierung de Einwirkung von Erschütterungen beim Transport von Kunstgegenständen*. 1990, Deutschland, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung: ZKK 4, Heft 1, S. 107-112

Thickett, David: *Vibration damage levels for museum objekts.* In: ICOM – 13th Triennial Meeting Rio de Janeiro, 22-27 Sept. 2002, Preprints Vol. I, 2002, London, James& James /Earthscan, S.90-95

VDI (2007) *: Ladeunssicherung auf Straßenfahrzeugen – Einrichtungen und Hilfsmittel zur Ladungssicherung.* Blatt 3.2, 2006-09,

Weber, Silvia; Schäffler, Hermann; Bruy, Erhard; Schelling, Günther : *Baustoffkunde : Aufbau und Technologie, Arten und Eigenschaften, Anwendung und Verarbeitung der Baustoffkunde.* 2012, 10. Auflage. Deutschland : Vogel Business Media GmbH & Co. KG, – ISBN 978-3-8343-3250-9, 278 Seiten

Weise, Klaus; Wöger, Wolfgang : *Meßunsicherheit und Meßdatenauswertung.* 1999, Weinheim ,Druck in Darmstadt Wiley-VCH GmbH, – ISBN 3-527-29610-7, Seiten 345

Anhang

A. Schwingungsmessung an Leinwand

Um einen ungefähren Eindruck der vorhandenen Schwingungsbildern auf der bemalten Schicht zu bekommen wird der von Herr Palmbach an der Universität Bern durchgeführte Dummyversuch erläutert.
Für diesen Versuch wurden verschiedene Gemäldedummies mit unterschiedlichen Leinwand-spannungen hergestellt. „[Das vorgestellte] Verfahren ist nicht an realen Gemälden anwend-bar, da diese durch das Ausbeulen des Bildträgers dauerhaft verformt und beschädigt werden können“ [Palmbach 2007]. Gemessen wurde mit zwei verschiedenen Geräten. Zum einen kam ein sehr kleiner und leichter uniaxialen Beschleunigungssensor, Model 352A73 der Firma PCB Piezotronics, den man direkt auf der Rückseite eines Gemäldes befestigen kann zum Einsatz. Ebenfalls wurde mit einem Triangulationslaser (Laser-Triangulations-Distanz-Sensor, Model OADM 12U6460/S35A der Firma Baumer Group) gearbeitet, der die Lein-wandschwingungen (besser gesagt die auftretenden Modes) berührungslos erfasst [E-Mailkontakt mit Herrn Palmbach].

Die Schwingungen eines Gemäldes sind abhängig von der Spannung des Bildträgers. Ein Gewebe besitzt an jeder Stelle eine andere Spannung (abnehmend von den Ecken zur Mitte hin) [Palmbach 2007]. Laut Herrn Bill Wei ist es unmöglich, ein bereits aufgespanntes Gewe-be auf seine statische Spannung zu untersuchen. Der Versuch stellte sich im Verhältnis Er-gebnis/Aufwand als nicht befriedigend heraus, da der Einsatz der Geräte mit einem sehr ho-hen technischen Aufwand verbunden war und für jedes zu transportierende Gemälde theore-tisch ein eigener Dummy hergestellt werden muss (es handelte sich um keine Datenlogger, sondern um Einzelsensoren, die eine separate Steuerung und Stromversorgung benötigen (keine kabellose Messung möglich). Das heißt, diese können nur ortsgebunden und sehr schwer in Bewegung stattfinden.) Herr Palmbach machte die Aussage, dass bei dem aktuellen Transportmonitoring an der Universität Bern kein Schwingungsverhalten der Leinwände mehr gemessen wird, da der Aufwand zu hoch ist. Außerdem sollten Transporte von Gemälden nicht ohne ein zusammenwirkendes System aus Zierrahmen, Rückseitenschutz und Frontver-glasung stattfinden, welcher im besten Fall die Leinwandschwingungen auf ein Minimum re-duziert. Somit reicht es aus am Zierrahmen zu messen, da die Schwingungen ungefähr gleich groß sind. Im Weiteren wird vereinfacht davon ausgegangen, dass die Leinwandschwingun-gen durch das System ‚Rahmen‘ so weit unterbunden werden, dass sie mit denen auf den Zierahmen wirkenden identisch sind.

B. Richtlinien des Doerner Instituts

Hinweise

zur Verpackung und zum Transport von Kunstwerken der Bayerischen Staatsgemäldesammlungen

Art und Weise der Verpackung, insbesondere Spezialverpackungen müssen grundsätzlich und rechtzeitig mit dem zuständigen Restaurator abgesprochen werden.

Klimakisten müssen 24 Stunden vor dem Verpackungstermin am Verpackungsort abgeliefert und geöffnet werden, um einen Klimaausgleich im Kisteninneren zu ermöglichen.

Zum Verpackungstermin muß ausreichend Personal, Packmaterial und passendes Werkzeug zur Verfügung stehen.

Für die Innenausstattung unserer Klimakisten und den Packvorgang gelten, soweit nicht anders abgesprochen, folgende grundsätzlichen Weisungen:

> Die Innenausstattung muß ganzflächig erfolgen. Die eingebauten Materialien (Neopolen und Weichfaser-Dämmplatten) müssen aus ganzen Stücken verarbeitet werden. Dies gilt insbesondere für die unmittelbar auf dem Bild liegende Dämmplatte!
> Die mit dem Bild bzw. mit dem Rahmen in Berührung kommenden Einbauteile müssen vollständig mit Filz kaschiert werden.
> Schrauben und Klebematerial in der Kiste sind auf der dem Bild abgewandten Seite anzubringen oder müssen kaschiert werden.
> Zum Herausheben des Bildes aus der Kiste ist ein Gurt vorzusehen, der beim Verpacken unter dem Bild und der unter dem Bild liegenden Weichfaser- Dämmplatte durchgeführt werden muß.
> Vor dem Einpacken müssen die Kisten mit dem Staubsauger gereinigt werden.
> Bei verglasten Bildern muß die Glasscheibe immer abgeklebt werden.
> Sofern keine andere Weisung erfolgt, werden Bilder grundsätzlich mit der Vorderseite nach unten und seitenrichtig in die Kiste gelegt. Dies ist insbesondere beim Umbau bereits vorhandener Klimakisten ist zu berücksichtigen.

Der Schraubenabstand am Kistendeckel soll nicht mehr als 20cm betragen. Außerdem soll an allen vier Ecken des Deckels eine Schraube vorgesehen werden, um der häufig zu beobachtenden Undichtigkeit an diesen Stellen zu begegnen.

Das Aus- bzw. Einpacken darf nur vom Fachpersonal der Transportfirma oder unter dessen Aufsicht vorgenommen werden.
Insbesondere am Ausstellungsort bei Ausstellungsende muß sichergestellt werden, daß die Objekte wieder ordnungsgemäß verpackt werden. Bereits verpackte Kisten müssen bei Übernahme durch die Spedition auf korrekte Verpackung hin überprüft werden.

Aus Sicherheitsgründen ist es nicht sinnvoll, auf der Aussenseite der Kisten den Inhalt in allen Einzelheiten zu deklarieren. In der Regel sollte die Besitzerangabe und/oder die Inventarnummer genügen.
Äusserlich unansehnliche Kisten sind anlässlich eines Innenumbaues neu zu streichen bzw. ungültige Beschriftungen sind zu überstreichen. Bei dieser Gelegenheit müssen auch defekte Schlösser oder Schrauben erneuert werden.

Versendeart und Versendeweg müssen grundsätzlich vor Transportbeginn mit den Verantwortlichen bei den Bayerischen Staatsgemäldesammlungen abgesprochen werden.

Die Transporte sind, falls nicht anders besprochen, grundsätzlich ab Verpackungsort auf dem direkten und kürzesten Weg auszuführen (keine Zwischenlagerung oder Umladung).

Bilderkisten müssen immer aufrecht und hierbei in Fahrtrichtung stehend befördert werden. Bilderkisten dürfen grundsätzlich nicht gestapelt werden.

Die Bilder dürfen nur mit hydraulisch- oder luftgefederten und klimatisierbaren sowie verschließbaren Fahrzeugen von ausreichender Grösse transportiert werden.

-2-

Für den Transport und zur Entladung bzw. zum Auspacken am Ankunftsort sind mindestens 2 Personen vorzusehen. Während des Transportes ist das Fahrverhalten der Empfindlichkeit des transportierten Gutes anzupassen. Das Fahrzeug darf zu keiner Zeit unbeaufsichtigt bleiben!

Bilderkisten dürfen nur am Bestimmungsort und hier nur in klimatisierten und gesicherten Räumen geöffnet werden. Insbesondere muß dafür gesorgt werden, daß notwendige Zollformalitäten nur am Absende- oder Bestimmungsort durchgeführt werden. Das Öffnen von Bilderkisten beim Passieren von Landesgrenzen oder im Luftfrachtbereich aus zollrechtlichen Gründen ist unter allen Umständen zu verhindern.

Bei geleerten, und hier vor allem bei großformatigen Kisten, ist der Kistendeckel mit allen Schrauben zu befestigen, um ein Verziehen der Kiste durch ungünstige Lagerungsbedingungen zu verhindern.

Bei allen auftretenden Fragen ist grundsätzlich mit den zuständigen Stellen der Bayerischen Staatsgemäldesammlungen Rücksprache zu halten.

Für Transporte per Luftfracht gelten zusätzlich folgende Hinweise:

Kunsttransporte sind als solche rechtzeitig bei der Frachtabteilung der jeweiligen Fluggesellschaft anzumelden. Kunstwerke der Bayerischen Staatsgemäldesammlungen werden grundsätzlich nicht als Übergepäck versandt.

Es ist durch die Spedition dafür Sorge zu tragen, daß sowohl am Flughafen des Absendeortes wie auch des Ankunftsortes zumindest ein Vertreter der Spedition alle Verlade- bzw. Entladearbeiten überwachen kann. Darüberhinaus soll für den als Kurier mitreisenden Vertreter der Bayerischen Staatsgemäldesammlungen eine Sondergenehmigung zur Überwachung dieser Arbeiten in Frachthalle und auf dem Flughafenvorfeld eingeholt werden. Dies ist bei fristgerechter Antragstellung (bei der jeweiligen Fluggesellschaft und beim Verkehrsassistenten, d.h. beim diensthabenden Sicherheitsbeamten) möglich.
Vereinbarungen über Treffpunkte oder Inempfangnahme unserer Kuriere durch Vertreter der Spedition müssen rechtzeitig und eindeutig erfolgen.

Unsere Klimakisten müssen wann immer möglich in Container und nur im Ausnahmefall auf Paletten verladen werden. Hierbei ist unbedingt auf sachgerechte Behandlung der Kisten zu achten und sicherzustellen, daß diese im Container bzw. auf der Palette ausreichend befestigt sind.
Bilderkisten dürfen nicht gestapelt und nicht gestürzt werden und es ist dafür Sorge zu tragen, daß keine gefährlichen Güter zusammen mit den Bilderkisten geladen werden.
Bei Ladung auf Palette ist unbedingt darauf zu achten, daß diese mit einer Schutzfolie versehen wird.
In jedem Falle müssen die Kisten in Fahrt- bzw. Flugrichtung geladen werden, um die Übertragung von Vibrationen zu minimieren.

Es ist dafür Sorge zu tragen, daß unsere Fracht als VIC behandelt wird und daß beladene Container versiegelt werden. Auf keinen Fall dürfen Bilderkisten unbeaufsichtigt im Frachtbereich verbleiben.
Zur Zwischenlagerung bis zum Verladen in das Flugzeug sind die Bilderkisten in speziell abgesicherten Bereichen zu deponieren.

Beim Be- und Entladen des Flugzeuges müssen die Bilderkisten so schnell wie möglich von der Frachthalle in das Flugzeug bzw. in umgekehrter Richtung verbracht werden. Dies gilt insbesondere bei ungünstigen Witterungsverhältnissen (Sonneneinstrahlung, Regen etc.)

C. Messprotokoll

Messprotokoll vom 24. Mai 2013

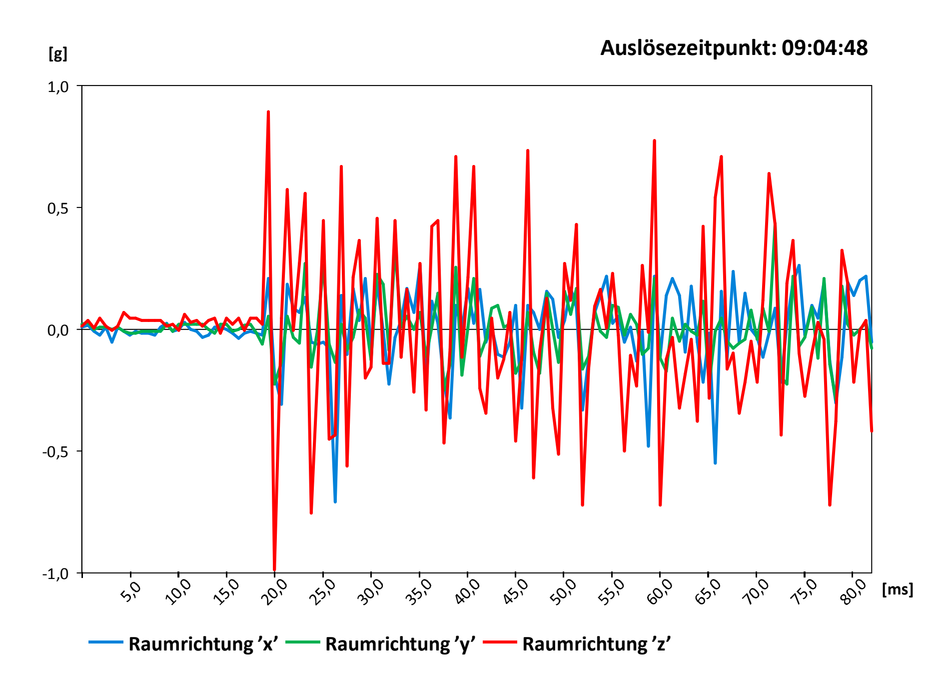
Transport eines Gemäldes von der Neuen Pinakothek in die Kunsthalle der Hypo Kulturstiftung
(Emissionserfassung am Zierrahmen des Kunstwerks)

Zeit (München)	Ereignis
09:01:35	Start der Messung (Beginn Phase 1)
09:04:48	Glas abkleben
09:04:48	Glas abkleben
09:05:03	Glas abkleben
09:06:32	Glas abkleben
09:07:18	anheben und drehen des Bildes 180°
09:08:33	anheben, kurzes absetzten (1)
09:08:34	anheben, kurzes absetzten (2)
09:08:45	Folie umschlagen und zukleben
09:11:02	Bild in auf dem Boden liegende Kiste gepakt
09:11:32	Deckel aufgesetzt
09:12:10	16 Schrauben mit Akkuschrauber in Kistendeckel geschraubt
09:13:33	Kiste wird vom waagrechten ins senkrechte gestellt (1)
09:13:33	Kiste wird vom waagrechten ins senkrechte gestellt (2)
09:37:54	Heben der aufgestellten Kiste auf den Hund (1)
09:37:54	Heben der aufgestellten Kiste auf den Hund (2)
	B**eginn Rollwagenfahrt**
09:38:10	Fahren der Kiste auf Linoliumboden
09:38:21	Bodenwechsel auf Asphalt
09:38:30	passieren der Laderampe
09:39:01	positionieren und festzurren der Kiste im LKW an linker Wand in Fahrtrichtung
	Beginn der LKW Fahrt (Beginn Phase 2)
09:39:58	Starten des Motors
09:40:01	Rückwärts anfahren
09:42:15	Bodenwelle und Kopfsteinpflaster
09:42:23	Rückwärts Berg auf auf dem Kopfsteinpflaster
09:42:34	Überfahren eines Bordsteins
09:42:43	Beschleunigung auf ca. 30Km/h in Fahrtrichtung auf Asphaltstraße
09:43:03	abbremsen
09:43:17	Rechts abbiegen
09:43:23	beschleunigen auf Asphaltstraße mit Trambahnschienen
09:43:36	Abbremsen an Ampel
09:43:49	beschleunigen
09:44:06	leichte Bodenunebenheiten
09:44:32	Fahrtgeschwindigkit ca. 40 Km/h
09:44:41	abbremsen und einfahren in einen Kreisverkehr (Linkskurve)
09:45:02	überfahren von Trambahnschienen bei rechts aufahren aus dem Kreisverkehr
09:45:24	Bodenunebenheiten und darauffolgendes abbremsen an Ampel
09:46:05	beschleunigen/Bodenunebenheit
09:46:16	abbremsen an Ampel
09:47:00	beschleunigen
09:47:20	linksabbiegen
09:47:25	rechtsabbiegen
09:47:36	Überfahren von Bodenunebenheiten
09:47:47	Rechtsabbiegen
09:48:02	Abbremsen
09:48:12	Beschleunigen/Bodenunebenheit
09:48:24	Abbremsen
09:48:37	Beschleunigen
09:48:51	Linksabbiegen
09:49:00	Zurücksetzten auf Kopfsteinpflaster
09:49:12	Einfahren in die TG (geteert)der Hypo Kulturstiftung
09:51:07	Motor gestoppt
10:06:00	Ladeklappe geöffnet
10:06:16	Bild von Spanngurten befreit (Beginn Phase 3)

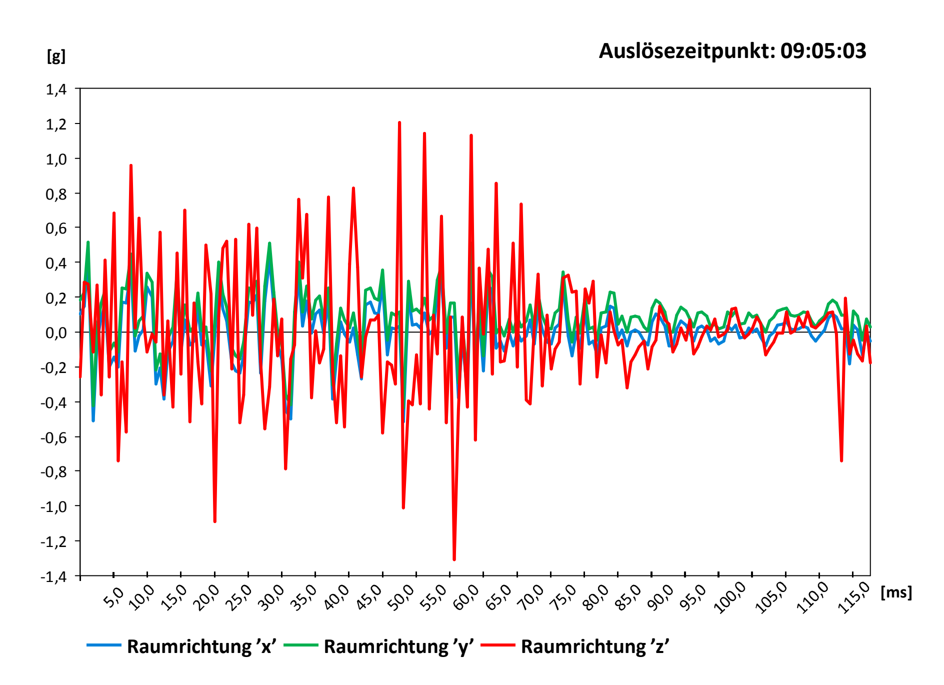
	Transporthund
10:06:19	auf Transporthunden positioniert
10:06:44	Bild wird aus LKW Laderaum gerollt
10:06:52	Laderampe fährt nach unten
10:07:07	Bild über Teerboden auf Eisenrampe gefahren
10:07:18	Rampe fährt nach oben
10:07:43	über Betonboden zu Aufzug bewegt
10:09:01	Einfahren der Transporthunde in den Aufzug
10:09:14	Aufzug fährt mit ruckeln los (1)
10:09:15	Aufzug fährt mit ruckeln los (2)
10:09:48	Transporthund über Holzboden gerollt
10:10:52	Transportkiste auf Holzboden abgestellt
10:12:00	Kiste abgelegt (waagrecht zum Fussboden)
10:12:03	Schrauben der Transportkiste werden entfernt
10:13:14	Deckel der Kiste abgenommen
10:13:36	Hartschaumplatte wird entfernt
	Rolltisch
10:14:03	Bild wird auf Teppich bezogenen Rolltisch so abgelegt (waagrecht, nicht gedreht)
10:14:11	Klebeband der PE-Folie wird entfernt
10:14:32	Pe-Folie geöffnet
10:14:59	Bild mit kurzem zwischenabsetzten um 180° gedreht
10:15:05	Stoß
10:15:15	Klebefolie vom Glas wird abgezogen
10:17:26	Stoß gegen Tisch
10:17:54	Klopfen auf Zierrahmen (1)
10:17:54	Klopfen auf Zierrahmen (2)
10:17:54	Klopfen auf Zierrahmen (3)
10:17:55	Aufhängedraht wird befestigt (links)
10:18:07	Auhängedraht wird befestigt (rechts)
10:18:07	Auhängedraht wird befestigt (rechts)
10:20:01	Auhängedraht wird befestigt (rechts)
10:35:02	Bild wird an Wand auf Schaumstoffkeilen abgestelltgestellt
10:44:23	Anheben des Bildes

D. Weitere Diagramme

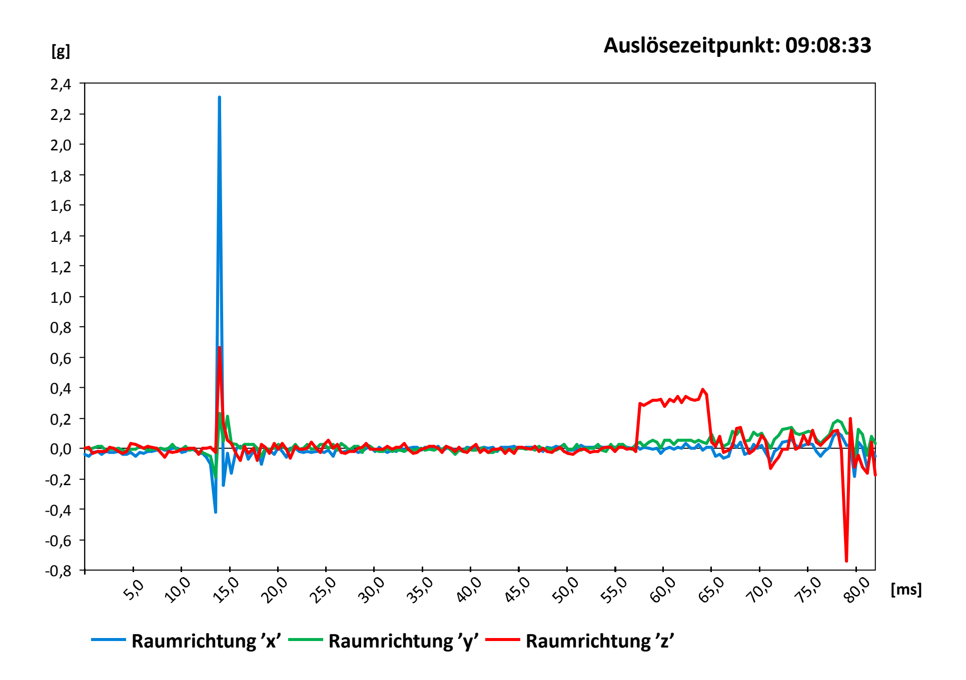
DETAILDARSTELLUNG | PHASE 1 – SCHOCK 1



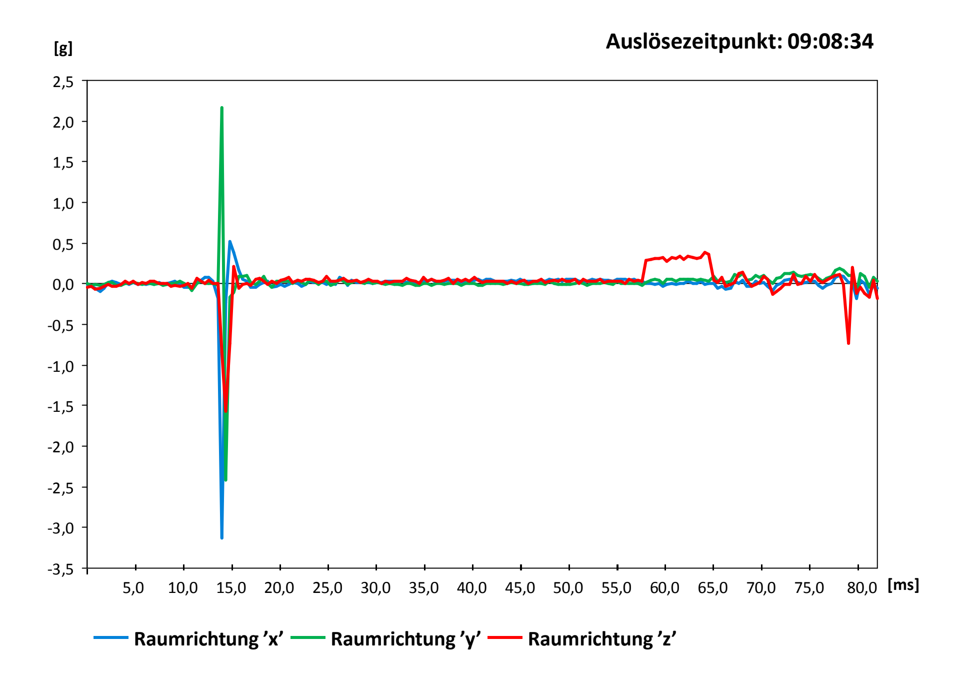
DETAILDARSTELLUNG | PHASE 1 – SCHOCK 3



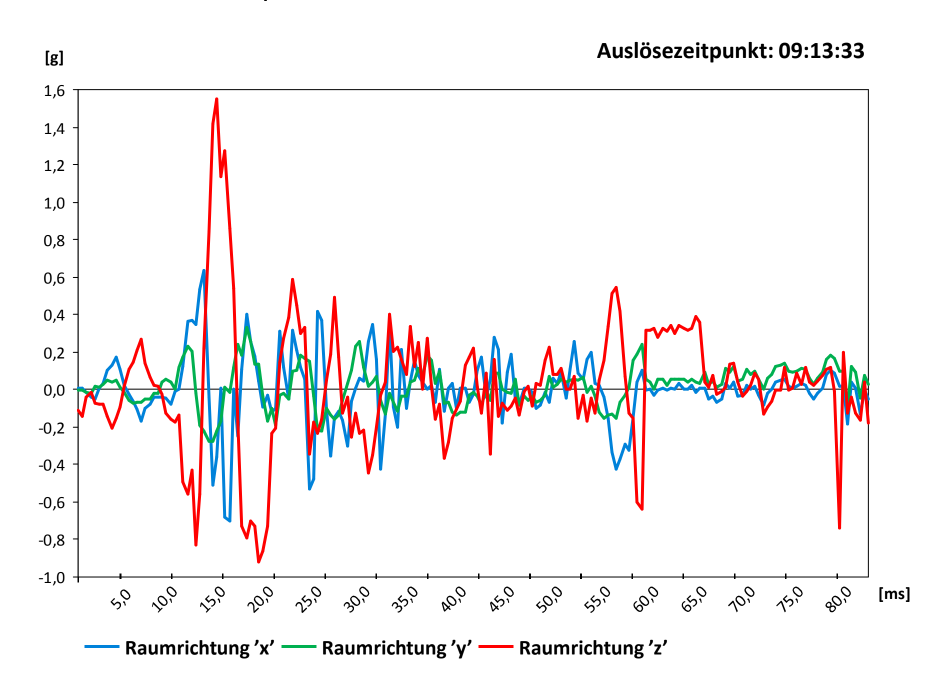
DETAILDARSTELLUNG | PHASE 1 – SCHOCK 6



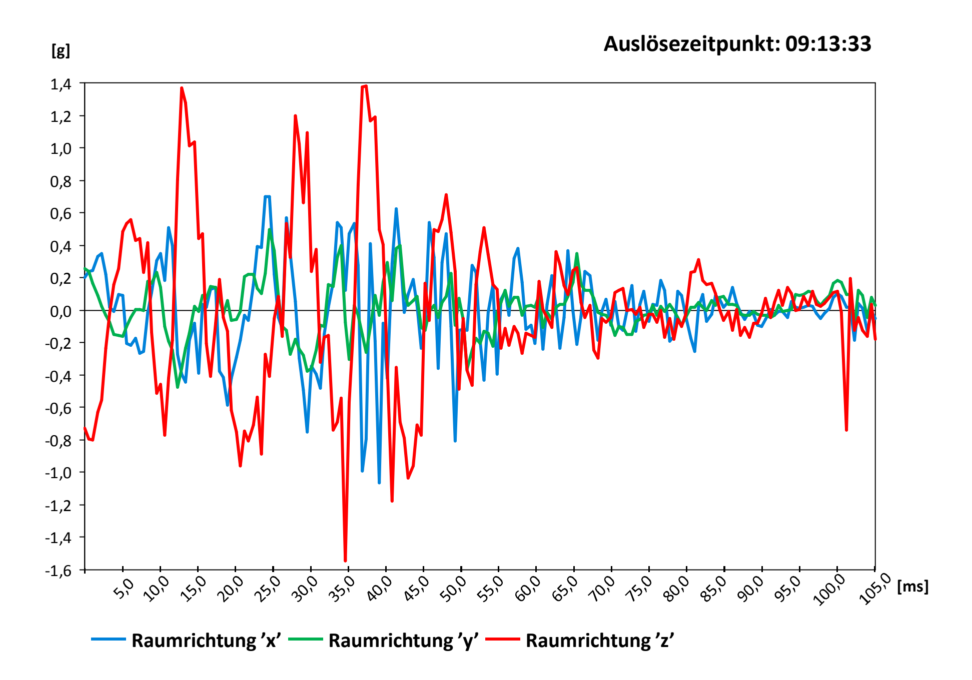
DETAILDARSTELLUNG | PHASE 1 – SCHOCK 7



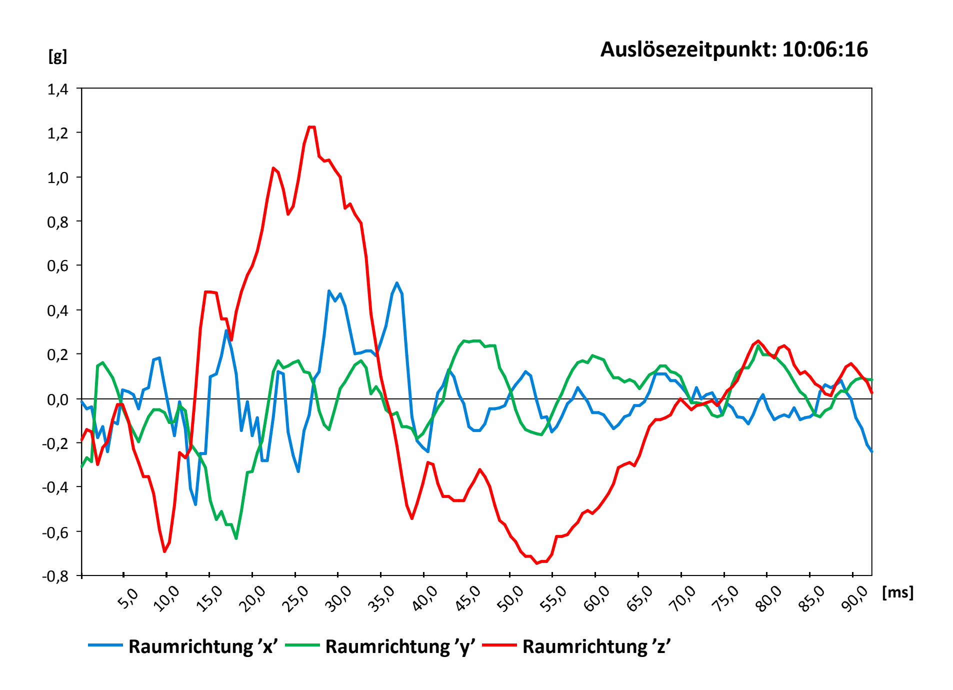
DETAILDARSTELLUNG | PHASE 1 – SCHOCK 8



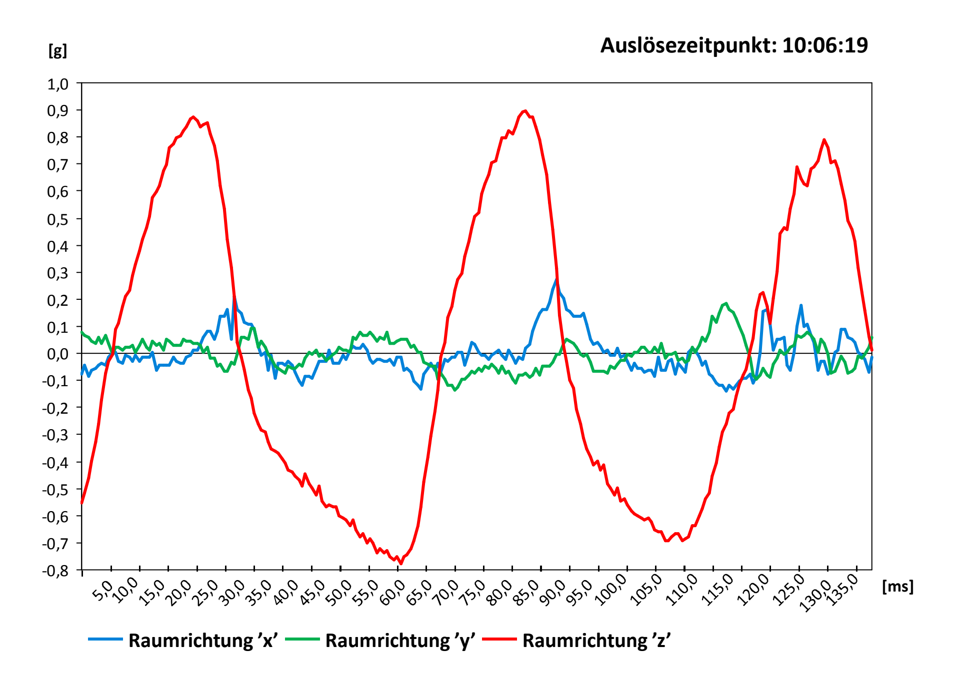
DETAILDARSTELLUNG | PHASE 1 – SCHOCK 9



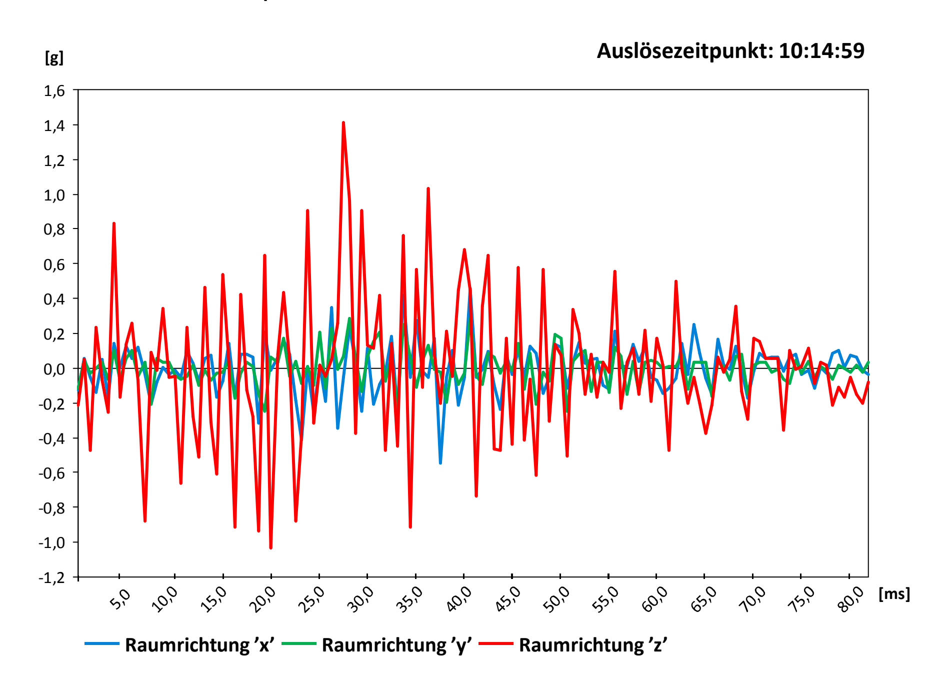
DETAILDARSTELLUNG | PHASE 3 – SCHOCK 1



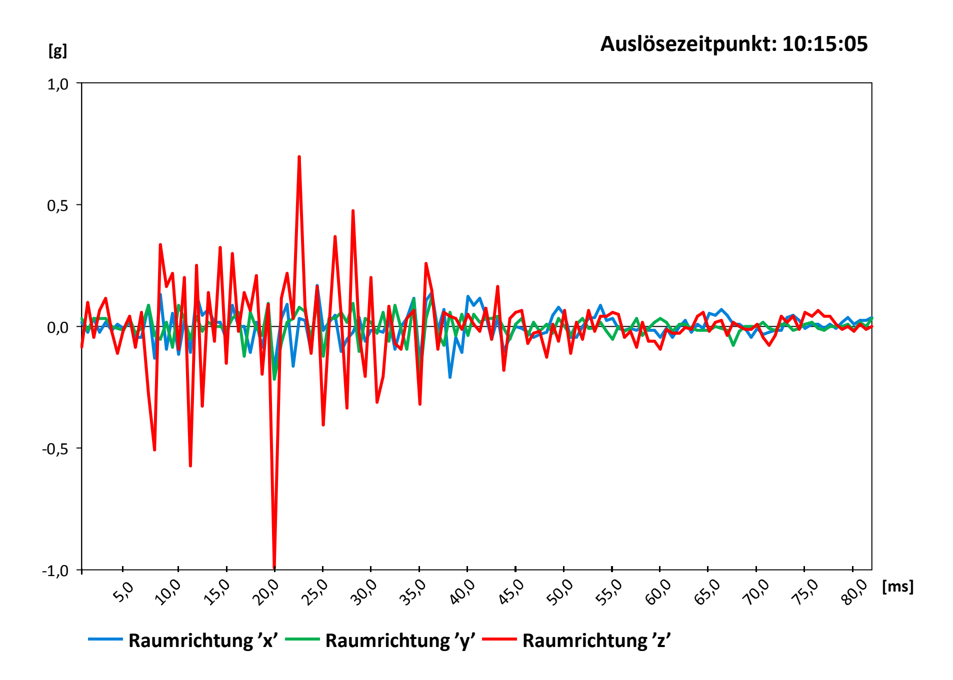
DETAILDARSTELLUNG | PHASE 3 – SCHOCK 2



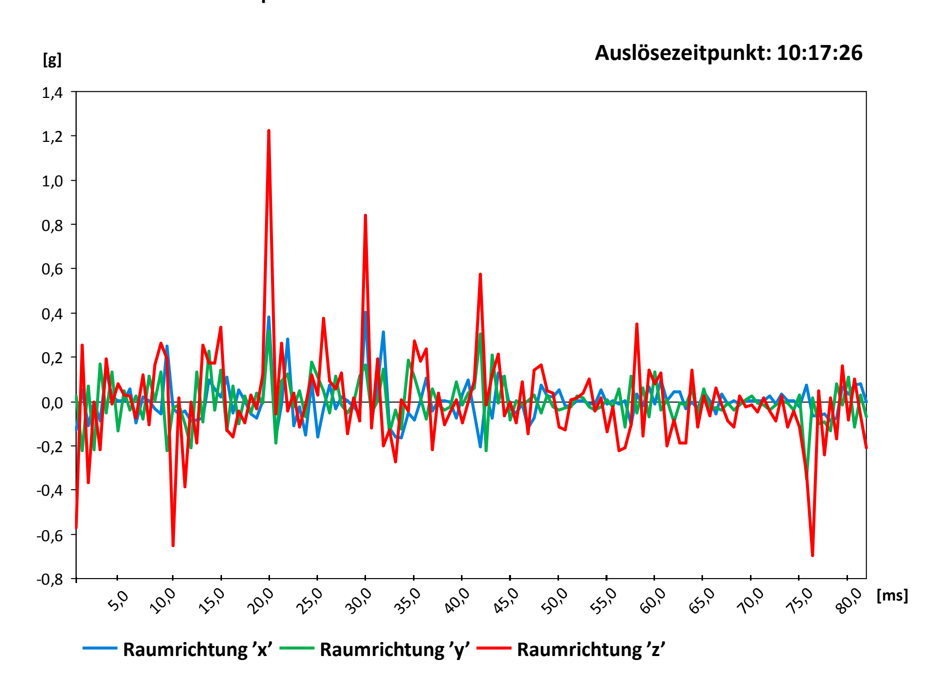
DETAILDARSTELLUNG | PHASE 3 – SCHOCK 5



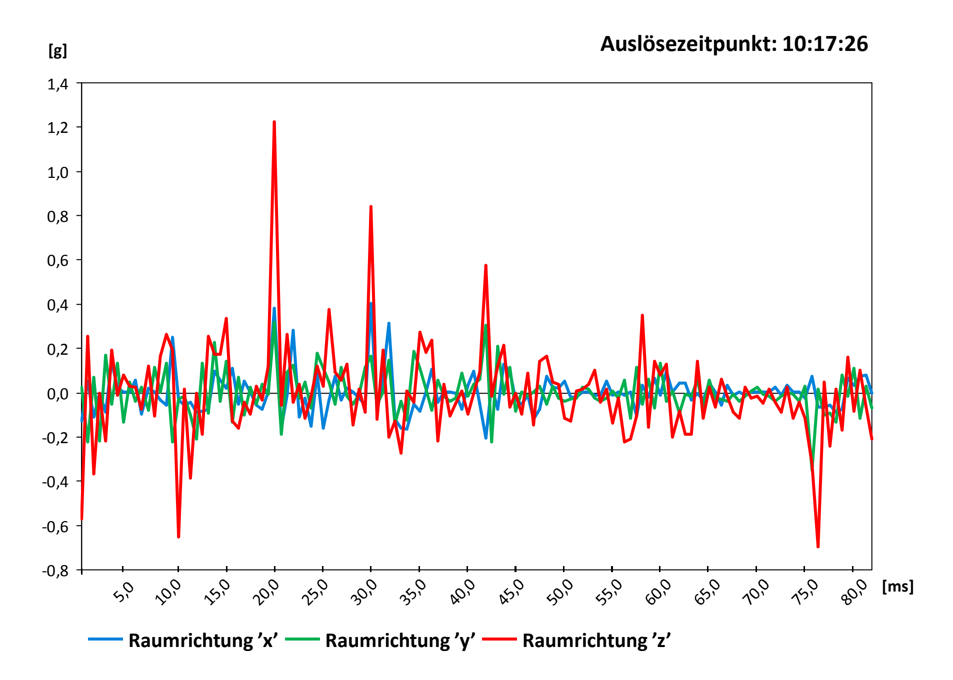
DETAILDARSTELLUNG | PHASE 3 – SCHOCK 6



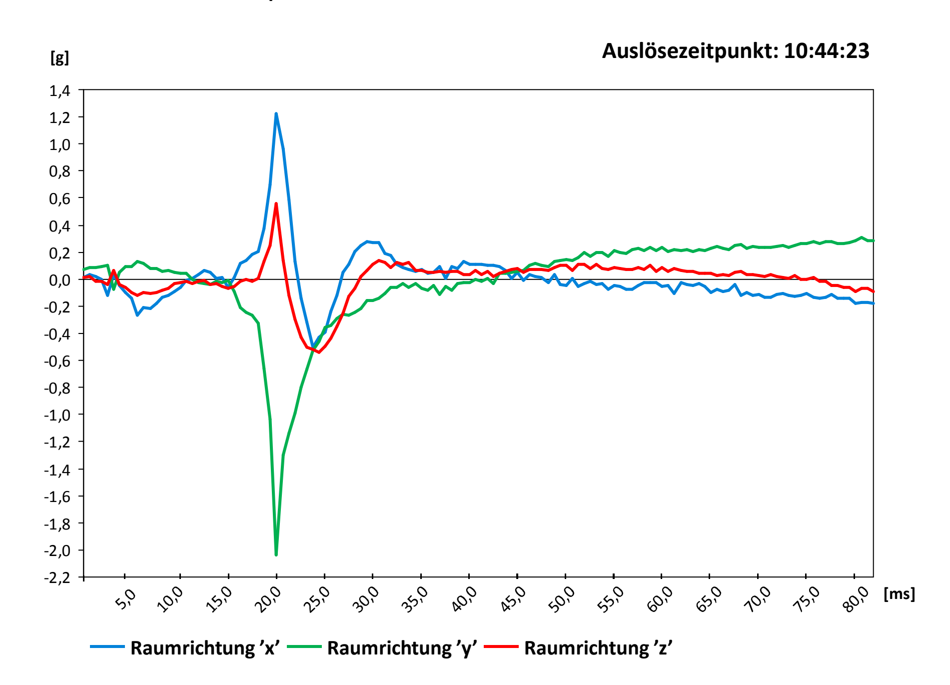
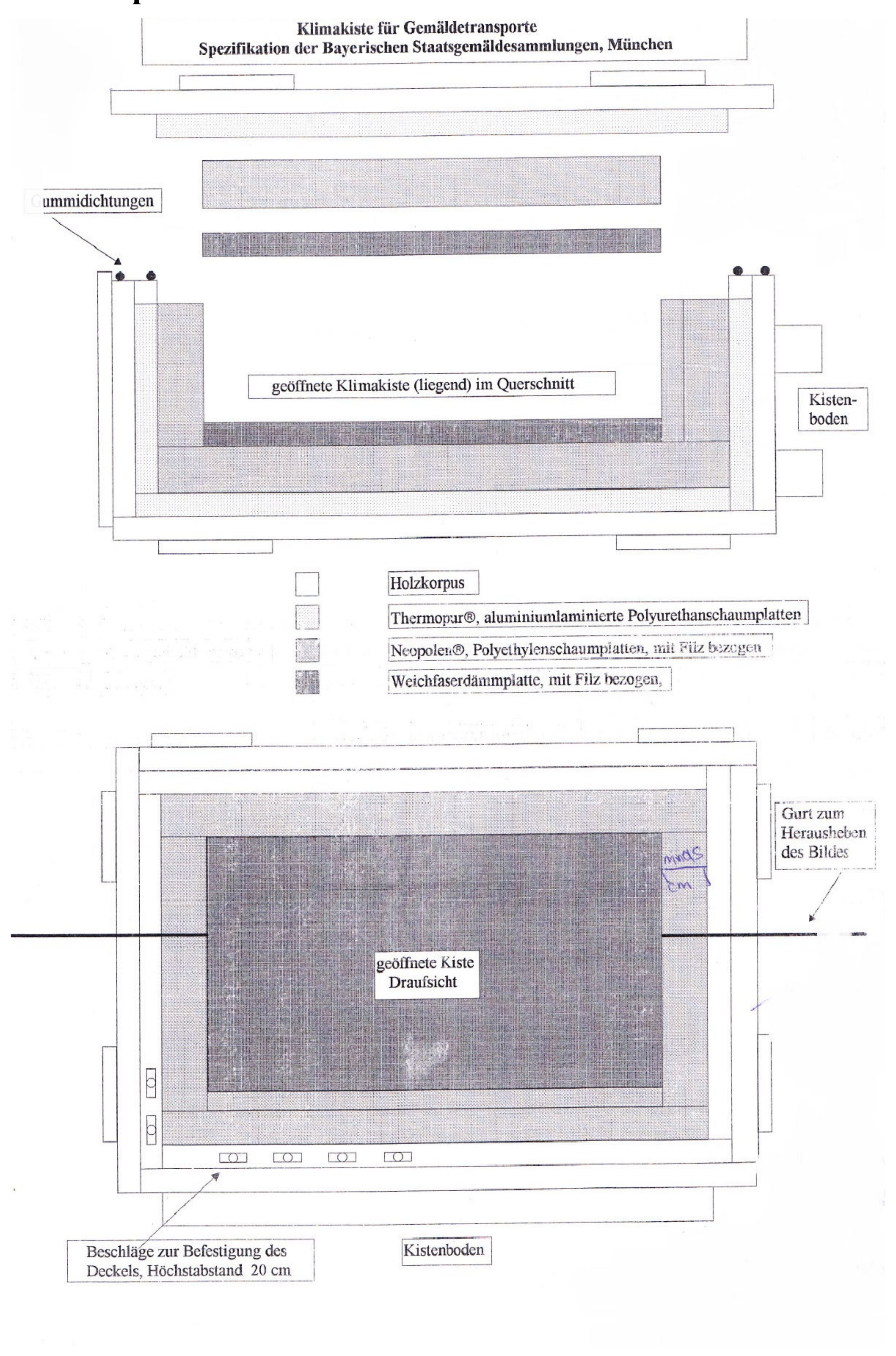
DETAILDARSTELLUNG | PHASE 3 – SCHOCK 7



DETAILDARSTELLUNG | PHASE 3 – SCHOCK 7



DETAILDARSTELLUNG | PHASE 3 – SCHOCK 14



E. Transportkiste